

DIALOG(R)File 351:Derwent WPI
(c) 2002 Derwent Info Ltd. All rts. reserv.

012458019 **Image available**
WPI Acc No: 1999-264127/199922
XRPX Acc No: N99-196736

Projection exposure apparatus
Patent Assignee: NIKON CORP (NIKR); ONDA M (ONDA-I); SUZUKI K (SUZU-I)
Inventor: ONDA M; SUZUKI K
Number of Countries: 081 Number of Patents: 008
Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Week
WO 9918604	A1	19990415	WO 98JP4536	A	19981007	199922 B
JP 11121322	A	19990430	JP 97291807	A	19971009	199928
AU 9894581	A	19990427	AU 9894581	A	19981007	199936
JP 11195602	A	19990721	JP 98283898	A	19981006	199939
EP 1037266	A1	20000920	EP 98947777	A	19981007	200047
			WO 98JP4536	A	19981007	
US 6235438	B1	20010522	US 98166884	A	19981006	200130
KR 2001015698	A	20010226	KR 2000703666	A	20000404	200161
US 20020012109	A1	20020131	US 98166884	A	19981006	200210
			US 2001819724	A	20010329	

Priority Applications (No Type Date): JP 98283898 A 19981006; JP 97274173 A 19971007; JP 97291807 A 19971009

Patent Details:

Patent No Kind Lan Pg Main IPC Filing Notes

WO 9918604 A1 J 111 H01L-021/027

Designated States (National): AL AM AT AU AZ BA BB BG BR BY CA CH CN CU CZ DE DK EE ES FI GB GE GH GM HU ID IL IS KE KG KR KZ LC LK LR LS LT LU LV MD MG MK MN MW MX NO NZ PL PT RO RU SD SE SG SI SK SL TJ TM TR TT UA UG UZ VN YU ZW

Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK EA ES FI FR GB GH GM GR IE IT KE LS LU MC MW NL OA PT SD SE SZ UG ZW

JP 11121322 A 10 H01L-021/027

AU 9894581 A H01L-021/027 Based on patent WO 9918604

JP 11195602 A 30 H01L-021/027

EP 1037266 A1 E H01L-021/027 Based on patent WO 9918604

Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL PT SE

US 6235438 B1 G03F-009/00

KR 2001015698 A H01L-021/027

US 20020012109 A1 G03B-027/42 Div ex application US 98166884
Div ex patent US 6235438

Abstract (Basic): WO 9918604 A1

NOVELTY - The optical system is adapted to project a mask pattern onto the base. The planar plates are positioned at the side of the base and at right angles to the optical axis of the optical system. A regulator is included to change the inclination of the plates to achieve this.

USE - Used in semiconductor manufacture.

pp; 111 DwgNo 1/21

Title Terms: PROJECT; EXPOSE; APPARATUS

Derwent Class: P82; P84; U11

International Patent Class (Main): G03B-027/42; G03F-009/00; H01L-021/027

International Patent Class (Additional): G03F-007/20; G03F-007/22

File Segment: EPI; EngPI

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-195602

(43) 公開日 平成11年(1999) 7月21日

(51) Int.Cl.⁸ 識別記号

H 0 1 L 21/027

G 0 3 F 7/20

5 2 1

F I

H 0 1 L 21/30

G 0 3 F 7/20

H 0 1 L 21/30

5 1 8

5 2 1

5 1 6 A

審査請求 未請求 請求項の数26 O L (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願平10-283898

(22) 出願日 平成10年(1998)10月6日

(31) 優先権主張番号 特願平9-274173

(32) 優先日 平9(1997)10月7日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 鈴木 広介

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株

式会社ニコン内

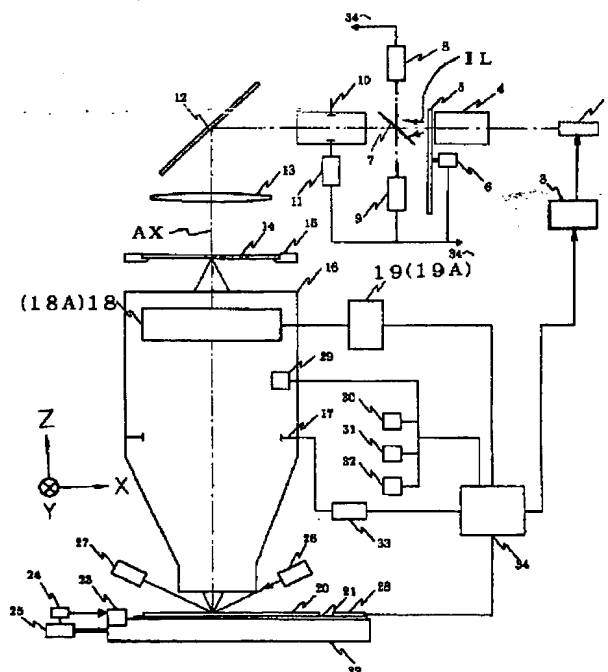
(74) 代理人 弁理士 大森 聡

(54) 【発明の名称】 投影露光方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】 露光光吸収によるレチクルの熱変形、又は投影光学系の光学部材の熱変形による結像特性の変化を高精度に補正する。

【解決手段】 走査露光方式でレチクル14のパターン像を投影光学系16を介してウエハ20上の各ショット領域に転写する。レチクル14のパターン存在率、及び熱吸収量より熱変形量の分布を求め、この分布より結像特性の各成分の変化量を求めると共に、投影光学系16を通過する露光光の光量を測定することで、露光光吸収による投影光学系16の結像特性の変化量を求める。走査露光前、又は走査露光中に、投影光学系16内の結像特性補正部18の所定のレンズ群の光軸方向の位置及び傾斜角、又はレチクル14とウエハ20との相対走査速度等を制御することで、結像特性の各成分の変化量を相殺するように結像特性を補正する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 マスクと基板とを同期して移動することにより、前記マスクのパターンの像を投影光学系を介して前記基板上に転写する投影露光方法において、走査露光前、又は走査露光中に、前記投影光学系の少なくとも1つの光学素子の光軸方向の位置、前記少なくとも1つの光学素子の光軸方向の傾斜角、前記マスクと前記基板との相対走査速度、及び前記マスクと前記基板との走査方向の平行度の内の少なくとも1つを調整して結像特性を補正することを特徴とする投影露光方法。

【請求項2】 マスクと基板とを同期して移動することにより、前記マスクのパターンの像を投影光学系を介して前記基板上に転写する投影露光方法において、前記マスクの熱変形による結像特性の変化を、走査方向の成分は前記マスクと前記基板との相対走査速度を調整することによって、非走査方向の成分は前記投影光学系の投影倍率とディストーションとを調整することによって、それぞれ補正することを特徴とする投影露光方法。

【請求項3】 前記マスクのパターン領域外で生じる熱移動、及び前記マスクのパターン存在率に基づいて前記マスクの熱吸収量を求め、該熱吸収量より前記マスクの熱変形量を計算することを特徴とする請求項2記載の投影露光方法。

【請求項4】 マスクと基板とを同期移動して、投影光学系を介して前記マスクのパターン像を前記基板上に転写する投影露光方法において、前記マスクの変形に応じて前記基板の走査露光中に前記マスクと前記基板との速度比を変更することを特徴とする投影露光方法。

【請求項5】 前記マスクに照射される照明光の吸収による前記マスクの移動方向に関する不均一な熱変形に基づいて前記速度比を変更することを特徴とする請求項4記載の投影露光方法。

【請求項6】 前記走査露光に先立ち、前記マスク、前記基板、及び前記パターン像の少なくとも1つの変形に基づいて、前記マスクと前記基板との速度比を調整しておくことを特徴とする請求項4又は5記載の投影露光方法。

【請求項7】 マスクと基板とを同期して移動することにより、前記マスクのパターンの像を投影光学系を介して前記基板上に転写する投影露光方法において、前記マスクの照明領域の幅を調整可能なブラインド機構を備え、前記基板上に結像される前記マスクのパターンの像の、走査方向と非走査方向との倍率変化の差に応じて、前記ブラインド機構を駆動して投影像のコントラストを補正することを特徴とする投影露光方法。

【請求項8】 マスクと基板とを同期して移動することにより、前記マスクのパターンの像を投影光学系を介して前記基板上に転写する投影露光方法において、前記マスクを載置するためのマスクステージ上に、前記

投影光学系の透過率測定用の光透過窓を備え、該光透過窓を介して前記投影光学系の透過率を測定することを特徴とする投影露光方法。

【請求項9】 前記光透過窓は、前記マスクを挟み、かつ前記マスクの移動方向に離れて2つ設けられることを特徴とする請求項8記載の投影露光方法。

【請求項10】 マスクのパターンの像を投影光学系を介して基板上に転写する投影露光方法において、前記投影光学系の複数の光学素子をそれぞれ独立的に駆動することにより、前記投影光学系の結像特性を補正すると共に、

前記投影光学系は前記基板側に第1平行平面板を備え、該第1平行平面板を光軸方向に駆動して、所定の結像特性を補正することを特徴とする投影露光方法。

【請求項11】 前記投影光学系は前記マスク側に、前記投影光学系の収差の残留成分を補正するために表面に所定の凹凸加工が施された第2平行平面板を備えることを特徴とする請求項10記載の投影露光方法。

【請求項12】 前記マスクは2次光源からの光ビームで照明され、前記2次光源の形状と大きさとの少なくとも一方を変更するごとに前記第1平行平面板を駆動して前記投影光学系の偏心コマ収差を補正することを特徴とする請求項10記載の投影露光方法。

【請求項13】 露光光源としてArFエキシマレーザ光源を使用し、かつ前記投影光学系内部を不活性ガス又は窒素ガスで置換することを特徴とする請求項10～12の何れか一項記載の投影露光方法。

【請求項14】 前記投影光学系内部の気圧を測定し、該測定結果に基づいて、結像特性を調整することを特徴とする請求項10～13の何れか一項記載の投影露光方法。

【請求項15】 マスクのパターンを投影光学系を介して基板上に転写する投影露光装置において、前記投影光学系は、前記マスクと前記基板との間で光軸に沿って配列される複数の光学素子と、前記基板側に配置される第1平行平面板と、前記マスク側に配置される第2平行平面板とを有し、

前記投影光学系の偏心コマ収差を調整するために前記第1平行平面板を移動すると共に、前記偏心コマ収差以外の前記投影光学系の収差、投影倍率、及び焦点位置の少なくとも1つを調整するために、前記第2平行平面板を前記マスクに対して相対移動することなく、前記複数の光学素子の少なくとも1つを移動する駆動装置を備えたことを特徴とする投影露光装置。

【請求項16】 前記駆動装置は、前記投影光学系の少なくとも3つの光学素子を移動して投影倍率、ディストーション、及び非点収差を調整することを特徴とする請求項15記載の投影露光装置。

【請求項17】 前記駆動装置は、前記投影光学系の少なくとも4つの光学素子を移動して投影倍率、ディスト

ーション、非点収差、及びコマ収差を調整することを特徴とする請求項15記載の投影露光装置。

【請求項18】 前記駆動装置は、前記投影光学系の少なくとも5つの光学素子を移動して投影倍率、ディストーション、非点収差、コマ収差、及び球面収差を調整することを特徴とする請求項15記載の投影露光装置。

【請求項19】 前記投影光学系の像面湾曲を調整するために、前記マスクと前記複数の光学素子とによって形成される複数の空間の内の少なくとも1つでの屈折率を変化させる調整装置を更に備えたことを特徴とする請求項15～18の何れか一項記載の投影露光装置。

【請求項20】 前記マスクのパターンに応じて2次光源の形状と大きさとの少なくとも一方を変更する照明光学系を更に備え、前記駆動装置は、前記2次光源の変更に連動して、前記複数の光学素子と前記第1平行平板との少なくとも1つを移動することを特徴とする請求項15～19の何れか一項記載の投影露光装置。

【請求項21】 前記投影光学系内の気圧を測定する測定器を更に備え、前記駆動装置は、前記気圧の変化に連動して、前記複数の光学素子と前記第1平行平板との少なくとも一つを移動することを特徴とする請求項15～20の何れか一項記載の投影露光装置。

【請求項22】 前記駆動装置は、前記第1平行平板を実質的に回転させることなく前記投影光学系の像面に対して相対的に傾けて前記投影光学系の偏心コマ収差を調整することを特徴とする請求項15～21の何れか一項記載の投影露光装置。

【請求項23】 前記第2平行平板は、前記投影光学系の非対称な収差を補正するようにその表面が凹凸加工されていることを特徴とする請求項15～22の何れか一項記載の投影露光装置。

【請求項24】 前記第2平行平板は、前記投影光学系の焦点位置、コマ収差、像面湾曲、ディストーション、色収差、及びテレセントリシティの1つを補正することを特徴とする請求項15～23の何れか一項記載の投影露光装置。

【請求項25】 前記第1及び第2平行平板の間に配置され、前記投影光学系の部分的な球面収差を補正する第3平行平板を更に備えることを特徴とする請求項15～24何れか一項記載の投影露光装置。

【請求項26】 前記マスクのパターンの像を前記基板上に走査露光するために、前記マスクと前記基板とを同期移動するステージ・システムを更に備えたことを特徴とする請求項15～25の何れか一項記載の投影露光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、例えば半導体素

子、撮像素子(CCD等)、液晶表示素子、又は薄膜磁気ヘッド等を製造するためのリソグラフィ工程中でマスクパターンをウエハ等の基板上に転写する際に使用される投影露光方法、及び装置に関し、特に結像特性の補正機構を備え、マスクと基板とを投影光学系に対して同期走査して露光を行うステップ・アンド・スキャン方式のような走査露光型の投影露光装置に使用して好適なものである。

【0002】

10 【従来の技術】マスクとしてのレチクルのパターンを投影光学系を介してレジストの塗布されたウエハ(又はガラスプレート等)上に転写する投影露光装置においては、常に高い結像特性を維持した状態で露光を行う必要がある。その結像特性に影響を与える要因の一つに、露光光の照射によるレチクルや投影光学系の光学素子の熱変形がある。従来より、例えば露光によるレチクルの熱変形に起因する結像特性の変化を補正するため、種々の提案がなされている。例えば、特開平4-192317号公報では、レチクルのパターン面内での変形量の分布を計算で求め、その変形による結像特性の変化を投影光学系の一部のレンズ素子を光軸方向に駆動するか、又は光軸に対して傾斜することで補正する技術が提案されている。

20 【0003】また、従来は一括露光型の投影露光装置(ステッパー)が多用されていたが、最近では投影光学系を大型化することなく大面積のレチクルのパターンを高精度に転写するために、レチクル及びウエハを投影光学系に対して同期走査して露光を行うステップ・アンド・スキャン方式のような走査露光型の投影露光装置(走査型露光装置)が注目されている。この走査型露光装置における露光光の照射による結像特性変化の補正に関しても、例えば特開平6-291016号公報において、一括露光型の場合の補正方法を適用して、照射による投影光学系の結像特性の変化量を補正する技術が開示されている。

【0004】

30 【発明が解決しようとする課題】上記の如く従来の走査型露光装置における結像特性の補正方法は、一括露光型で考えられた方法を適用した技術がほとんどであり、走査型露光装置に特有のレチクルと投影光学系とを含めた装置全体での露光光の照射による結像特性の変化を考慮した補正方法は無かった。

40 【0005】しかしながら、走査型露光装置において使用されるレチクルに描かれている原版パターンは、一括露光型用のレチクルと同程度か、それ以上の大面積を有するものであり、走査露光中にはその原版パターンの全面が所謂スリット状の照明領域で逐次照明される。これに対して、投影光学系は常にそのスリット状の照明領域で非軸対称に照射される状態になるため、レチクルと投影光学系との熱変形量に関する計算方法、及び対応する

結像特性の補正方法には自ずと違いが生じてくる。また、レチクルが熱膨張した場合と投影光学系が熱膨張した場合とでは、ウエハ上に形成される投影像に対する影響が異なる。

【0006】更に、一括露光型の投影露光装置においても、近年投影露光されるパターンの線幅はますます微細化し、更に高精度に結像特性を補正することが要求されている。本発明は斯かる点に鑑み、高精度に結像特性を補正できる投影露光方法を提供することを第1の目的とする。

【0007】更に本発明は、特に走査型露光装置において、露光光吸収による投影光学系の結像特性の変化量、又はレチクルの熱変形による結像特性の変化量をそれぞれ正確に求めることができ、それに応じてその結像特性の補正を高精度に行って、レチクルのパターン像をウエハ上に高精度に転写することができる投影露光方法を提供することを第2の目的とする。

【0008】更に本発明は、そのような投影露光方法を実施できる投影露光装置をも提供することを第3の目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明による第1の投影露光方法は、マスク(14)と基板(20)とを同期して移動することにより、そのマスク(14)のパターンの像を投影光学系(16)を介してその基板(20)上に転写する投影露光方法において、走査露光前、又は走査露光中に、投影光学系(16)の少なくとも1つの光学素子(36~40)の光軸方向の位置、その少なくとも1つの光学素子(36~40)の光軸方向の傾斜角、マスク(14)と基板(20)との相対走査速度、及びマスク(14)と基板(20)との走査方向の平行度の内の少なくとも1つを調整して結像特性を補正するものである。

【0010】斯かる本発明の投影露光方法によれば、走査露光前、又は走査露光中に、投影光学系(16)の少なくとも1つの光学素子(36~40)の位置や傾斜角を調整することで、投影像の倍率誤差や所定のディストーション等が補正される。また、マスク(14)と基板(20)との相対走査速度を調整することで、その投影像の走査方向の倍率誤差が補正でき、マスク(14)と基板(20)との走査方向の平行度を調整することで、例えば平行四辺形状のディストーション(所謂スキュー誤差)が補正できる。特にそれらの調整を走査露光中に行うと、マスクの走査方向での部分的な熱変形にも対応できる。

【0011】また、本発明による第2の投影露光方法は、マスク(14)と基板(20)とを同期して移動することにより、そのマスク(14)のパターンの像を投影光学系(16)を介してその基板(20)上に転写する投影露光方法において、そのマスク(14)の熱変形

による結像特性の変化を、走査方向の成分はマスク(14)と基板(20)との相対走査速度を調整することによって、非走査方向の成分は投影光学系(16)の投影倍率を調整することによって、それぞれ補正するものである。

【0012】斯かる投影露光方法によれば、マスクが走査方向に熱膨張している場合には、基板(20)の走査速度を、マスクの走査速度に投影光学系の投影倍率を乗じて定まる基準速度よりも遅くすることで、走査方向のみの倍率が補正される。一方、マスクが非走査方向(走査方向に直交する方向)に熱膨張している場合には、投影光学系の投影倍率を調整し、それを相殺するようにマスクと基板との相対走査速度を調整することで、非走査方向のみの倍率が補正される。

【0013】この場合、そのマスク(14)のパターン領域外で生じる熱移動、及びそのマスク(14)のパターン存在率に基づいてそのマスク(14)の熱吸収量を求め、この熱吸収量よりそのマスク(14)の熱変形量を計算することが望ましい。このようにパターン領域外の熱移動、及びパターン存在率を考慮することで、マスクの熱変形量が高精度に求められ、それに応じてその熱変形による結像特性の変化を高精度に補正することができる。また、本発明による第3の投影露光方法は、マスク(14)と基板(20)とを同期移動して、投影光学系(16)を介してそのマスクのパターンの像をその基板上に転写する投影露光方法において、そのマスクの変形に応じてその基板の走査露光中にそのマスクとその基板との速度比を変更するものである。これによって、そのマスクの走査方向の変形の影響を軽減できる。

【0014】また、本発明による第4の投影露光方法は、マスク(14)と基板(20)とを同期して移動することにより、そのマスク(14)のパターンの像を投影光学系(16)を介してその基板(20)上に転写する投影露光方法において、そのマスク(14)の照明領域の幅を調整可能なブラインド機構(10)を備え、その基板(20)上に結像されるそのマスク(14)のパターンの像の、走査方向と非走査方向との倍率変化の差に応じて、そのブラインド機構(10)を駆動し投影像のコントラストを補正するものである。

【0015】斯かる投影露光方法によれば、マスク上の照明領域の幅(走査方向、非走査方向の何れも同様)を広くすれば、基板上でのその方向の照度が高くなり、逆にその照明領域の幅を狭くすれば、基板上でのその方向の照度が低下する。また、マスク上での照度が同一であれば、投影倍率が高くなれば基板上での照度は低下し、投影倍率が低くなれば基板上での照度は高くなる。従って、走査方向、及び非走査方向の倍率が異なるときに、それを相殺するようにブラインド機構(10)を介して照明領域の幅を変えることで、基板上での走査方向及び非走査方向の照度が一定に保たれて、投影像のコントラ

ストのむらが無くなる。

【0016】また、本発明による第5の投影露光方法は、マスク(14)と基板(20)とを同期して移動することにより、そのマスク(14)のパターンの像を投影光学系(16)を介してその基板(20)上に転写する投影露光方法において、そのマスク(14)を載置するためのマスクステージ(15)上に、その投影光学系(16)の透過率測定用の光透過窓(55, 56)を備え、この光透過窓を介してその投影光学系(16)の透過率を測定するものである。

【0017】斯かる投影露光方法によれば、マスクステージ(15)上の光透過窓(55, 56)を介して投影光学系(16)の透過率を測定することにより、投影光学系(16)の露光光吸収による結像特性の変化を求めることができ、これに基づいて高精度に結像特性を補正できる。この場合、2つの光透過窓(55, 56)を、マスク(14)を挟み、かつマスク(14)の移動方向に離して設置することが望ましい。マスクの走査方向に応じてどちらかの光透過窓を使用できるため、測定効率が高く維持される。

【0018】次に、本発明による第6の投影露光方法は、マスク(14)のパターンの像を投影光学系(16)を介して基板(20)上に転写する投影露光方法において、その投影光学系(16)の複数の光学素子(36~40)をそれぞれ独立的に駆動することにより、その投影光学系(16)の結像特性を補正し、その投影光学系(16)はその基板(20)側に第1平行平板(41)を備え、この第1平行平板(41)を光軸方向に駆動して、所定の結像特性を補正するものである。

【0019】斯かる投影露光方法によれば、投影光学系(16)の複数の光学素子(36~40)の駆動と、投影光学系(16)の第1平行平板(41)の駆動とを組み合わせることによって、種々の結像特性が高精度に補正できる。この場合、その投影光学系(16)はマスク(14)側に、その投影光学系の収差の残留成分を補正するために表面に所定の凹凸加工が施された第2平行平板(35)を備えることが望ましい。この第2平行平板によって残留するディストーション等が補正できる。

【0020】また、一例として、そのマスク(14)は2次光源(5a~5d)からの光ビームで照明され、その2次光源(5a~5d)の形状と大きさとの少なくとも一方を変更することによりその第1平行平板(41)を駆動して投影光学系(16)の偏心コマ収差を補正するようにしてもよい。また、露光光源(1)としてArFエキシマレーザ光源を使用している場合に、その投影光学系(16)内部を不活性ガス(ヘリウム等)又は窒素ガスで置換することが望ましい。この場合、不活性ガスで置換する場合には、ArFエキシマレーザ光の波長(193nm)付近に吸収帯を有する酸素が殆ど無い

めに、露光光に対する透過率が向上する。同様に窒素ガスで置換する場合にも、窒素ガスはArFエキシマレーザ光を殆ど吸収しないため、露光光に対する透過率が向上する。

【0021】特に前者のように不活性ガスで置換する場合には、大気圧の変動の影響が投影光学系の内部に殆ど及ばなくなるため、投影光学系(16)内部の気圧変化による結像特性の変化を抑制することができる。また、投影光学系(16)内部の気圧を測定し、この測定結果に基づいて結像特性の補正をすることが望ましい。その内部の気圧の変化によっても結像特性が変化するため、それに応じた補正を行うことで、より高精度に結像特性を補正できる。

【0022】次に、本発明による投影露光装置は、マスク(14)のパターンの像を投影光学系(16)を介して基板(20)上に転写する投影露光装置において、その投影光学系は、そのマスク(14)とその基板(20)との間で光軸に沿って配列される複数の光学素子(36~40)と、その基板側に配置される第1平行平板(41)と、そのマスク側に配置される第2平行平板(35)とを有し、その投影光学系の偏心コマ収差を調整するためにその第1平行平板(41)を移動すると共に、その偏心コマ収差以外のその投影光学系の収差、投影倍率、及び焦点位置の少なくとも1つを調整するために、その第2平行平板(35)をそのマスク(14)に対して相対移動することなく、その複数の光学素子(36~40)の少なくとも1つを移動する駆動装置(42~47)を備えたものである。

【0023】斯かる本発明の投影露光装置によれば、本発明の第5の投影露光方法が実施できる。この場合、その駆動装置(42~46)は、一例としてその投影光学系(16)の少なくとも3つの光学素子を移動するものである。これによって投影倍率、ディストーション、及び非点収差を調整できる。

【0024】また、その駆動装置(42~46)は、その投影光学系(16)の少なくとも4つの光学素子を移動してもよい。これによって投影倍率、ディストーション、非点収差、及びコマ収差を調整できる。また、その駆動装置(42~46)は、その投影光学系(16)の少なくとも5つの光学素子を移動してもよい。これによって投影倍率、ディストーション、非点収差、コマ収差、及び球面収差を調整できる。

【0025】また、その投影光学系(16)の像面湾曲を調整するために、そのマスク(14)とその複数の光学素子(36~40)とによって形成される複数の空間の内の少なくとも1つ(18A)での屈折率を変化させる調整装置(19A)を更に備えることが望ましい。また、照明光学系において、マスク(14)のパターンに応じて2次光源(5a~5d)の形状と大きさとの少なくとも一方を変更したときに、2次光源(5a~5d)

の変更に関連して、複数の光学素子(36~40)と第1平行平面板(41)との少なくとも1つを移動することが望ましい。

【0026】また、その投影光学系(16)内の気圧を測定する測定器(29)を更に備え、その駆動装置(42~47)は、その気圧の変化に関連して、その複数の光学素子(36~40)とその第1平行平面板(41)との少なくとも一つを移動することが望ましい。また、その駆動装置(42~47)は、第1平行平面板(41)を実質的に回転させることなく投影光学系(16)の像面に対して相対的に傾け、投影光学系(16)の偏心コマ収差を調整することが望ましい。

【0027】また、その第2平行平面板(35)は、投影光学系(16)の非対称な収差を補正するようにその表面が凹凸加工されていることが望ましい。また、そのマスク(14)のパターンの像をその基板(20)上に走査露光するために、そのマスク(14)とその基板(20)とを同期移動するステージ・システムを更に備えることが望ましい。これは、本発明を走査露光型の投影露光装置に適用することを意味する。

【0028】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態につき図面を参照して説明する。以下の実施の形態は、ステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置で露光を行う場合に本発明を適用したものである。

〔第1の実施の形態〕図1は本例で使用されるステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置を示し、この図1において、KrF、又はArF等のエキシマレーザ光源よりなる露光光源1から射出された紫外パルス光よりなる露光光は、不図示のビーム整形光学系、光量減衰器等を経てフライアイレンズ4に入射する。フライアイレンズ4の射出面には、照明系の開口絞り板5が回転自在に配置され、開口絞り板5の回転軸の周りには、図4に示すように、通常照明用の円形の開口絞り5a、小さいコヒーレンスファクタ(σ 値)用の小さい円形の開口絞り5b、輪帯照明用の輪帯状の開口絞り5c、及び複数の偏心した小開口よりなる変形照明用の開口絞り5bが配置されている。なお、必要に応じて更に多くの照明系開口絞りを設けてもよい。

【0029】図1に戻り、装置全体の動作を統轄制御する主制御系34が、駆動モータ6を介して開口絞り板5を回転することによって、フライアイレンズ4の射出面に所望の照明系開口絞りを配置できるように構成されている。主制御系34には、後述のようにレチクルの変形量や結像特性の補正量等を計算するためのコンピュータも含まれている。フライアイレンズ4の射出面の開口絞りを通過した露光光ILの一部は、ビームスプリッタ7にて反射された後、光電検出器よりなるインテグレートセンサ8に入射する。インテグレートセンサ8の検出信号は主制御系34に供給され、主制御系34は、その検

出信号より露光光ILのウエハ20の表面での照度(パルスエネルギー)、及びウエハ20上の各点での積算露光量を間接的にモニタする。そして、このようにモニタされる照度、又は積算露光量が目標値になるように主制御系34は、電源装置3を介して露光光源1の出力を制御すると共に、不図示の光量減衰器での露光光の減衰率等を制御する。

【0030】一方、ビームスプリッタ7を透過した露光光ILは、不図示のリレーレンズ、レチクルブラインド10、光路折り曲げ用のミラー12、及びコンデンサレンズ13を経て、レチクル14のパターン面(下面)に設けられたパターン領域内の矩形の照明領域を照明する。レチクル14の照明領域内のパターンは、投影光学系16を介して所定の投影倍率 β (β は $1/4$ 、 $1/5$ 等)でレジストが塗布されたウエハ20上の露光領域に縮小投影される。投影光学系16内のレチクル14のパターン面に対する光学的フーリエ変換面(瞳面)内には開口絞り17が配置されており、主制御系34が駆動系33を介して開口絞り17の開口径を制御することによって、投影光学系16の開口数NAが設定される。

【0031】また、レチクルブラインド10の配置面は、レチクル14のパターン面とほぼ共役であり、レチクルブラインド10の開口形状によってレチクル14上での矩形の照明領域の形状、及び大きさが設定される。本例では、主制御系34が駆動系11を介してレチクルブラインド10の開口形状を制御することができ、これによってレチクル14上での照明領域の走査方向、及びこれに直交する非走査方向の幅を調整できるようになっている。その照明領域の幅の制御によってウエハ20上での走査方向、及び非走査方向の照度が調整できる。更に、不図示であるが、レチクルブラインド10(固定ブラインド)の近傍に、走査露光の開始直後、及び終了直前に不要な部分への露光を防ぐために、レチクルブラインド10の開口部を覆うための可動ブラインドも備えられている。但し、この可動ブラインドの機能をレチクルブラインド10で兼用してもよい。以下、投影光学系16の光軸AXに平行にZ軸を取り、Z軸に垂直な平面内で走査露光時の走査方向(図1の紙面に垂直な方向)に沿ってY軸を取り、非走査方向(図1の紙面に平行な方向)に沿ってX軸を取って説明する。

【0032】まず、レチクル14はレチクルステージ15上に保持されている。図5は、レチクルステージ15の駆動機構を示し、この図5において、レチクルステージ15は、微動ステージ48上に回転自在に載置され、微動ステージ48は、粗動ステージ50上に駆動モータ51によってX方向に微動できるように載置されている。粗動ステージ50は、Y方向(走査方向)に沿って配置された1組のガイド52上にエアベアリングを介して設置され、粗動ステージ50はガイド52に沿って例えばリニアモータによってY方向に連続移動する。微

動ステージ48に対してレチクルステージ15は回転機構49を介して連結され、レチクルステージ15は3箇所の引っ張りコイルばね60によって回転機構49側に付勢されており、回転機構49によってレチクルステージ15は微動ステージ48に対して回転する。即ち、レチクルステージ15は、Y方向に連続移動できると共に、X方向、Y方向、回転方向に微動できるように支持されている。

【0033】また、レチクルステージ15上の-Y方向の端部、及び+X方向の端部にそれぞれY軸の移動鏡54、及びX軸の移動鏡53が固定され、移動鏡54には不図示のY軸の例えば2軸のレーザ干渉計よりレーザビームが照射され、移動鏡53には不図示のX軸のレーザ干渉計よりレーザビームが照射され、これらのレーザ干渉計によってレチクルステージ15のX座標、Y座標、及び回転角が計測されている。これらの計測値は図1の主制御系34に供給され、主制御系34はこれらの計測値に基づいて不図示のリニアモータ等を介してレチクルステージ15の移動速度、及び位置を制御する。

【0034】図1に戻り、ウエハ20は不図示のウエハホルダ上に吸着保持され、ウエハホルダは試料台21上に固定され、試料台21上のウエハ20（ウエハホルダ）の近傍には光電検出器よりなる照射量モニタ28が取り付けられ、照射量モニタ28の検出信号が主制御系34に供給されている。そして、試料台21は、この試料台21をY方向に連続移動し、X方向、Y方向にステップ駆動するウエハステージ22上に固定されている。ウエハステージ22には、試料台21のZ方向の位置（フォーカス位置）、及び傾斜角を制御するZステージ機構も組み込まれている。

【0035】投影光学系16の側面に送光系26、及び受光系27よりなるオートフォーカスセンサ（以下、「AFセンサ26、27」と呼ぶ）が配置され、送光系26からウエハ20の表面に斜めに投影される複数のスリット像を受光系27で再結像し、再結像された像の横ずれ量を検出することによって、それらのスリット像が投影された複数の計測点でのフォーカス位置が検出され、検出結果がウエハステージ駆動系25に供給されている。ウエハステージ駆動系25は、AFセンサ26、27によって検出される複数のフォーカス位置が、主制御系34より予め入力されている投影光学系16の像面の位置に合致するように、オートフォーカス方式、及びオートレベリング方式でウエハステージ22内のZステージ機構を駆動する。

【0036】また、ウエハステージ22上に直交する反射面を有する移動鏡23が固定され、外部の3軸のレーザ干渉計24から移動鏡23にレーザビームが照射され、それらのレーザ干渉計によって試料台21（ウエハ20）のX座標、Y座標、及び回転角が計測され、この計測値がウエハステージ駆動系25、及び主制御系34

に供給されている。ウエハステージ駆動系25は、レーザ干渉計24の計測値、及び主制御系34からの制御情報に基づいてウエハステージ22をX方向、Y方向に駆動する。

【0037】走査露光時には、レチクルステージ15を介してレチクル14を矩形的照明領域に対して+Y方向（又は-Y方向）に速度VRで移動するのと同期して、ウエハステージ22を介してウエハ20を矩形的露光領域に対して-Y方向（又は+Y方向）に速度 $\beta \cdot VR$ （ β はレチクル14からウエハ20への投影倍率）で移動することによって、レチクル14のパターン領域内のパターン像がウエハ20上の1つのショット領域に逐次転写される。その後、ウエハステージ22をステップングさせてウエハ20上の次のショット領域を走査開始位置に移動して、走査露光を行うという動作がステップ・アンド・スキャン方式で繰り返されて、ウエハ20上の各ショット領域への露光が行われる。この際に、インテグレートセンサ8の検出信号に基づいて、主制御系34が各ショット領域上の各点に対する露光量を所定の目標値に制御する。

【0038】さて、このような走査露光を継続すると、露光光ILの照射熱によってレチクル14、及び投影光学系16を構成する各光学部材が膨張、又は変形し、これらに応じてウエハ20上に投影される投影像の倍率、及び諸収差等の結像特性も次第に変化してしまい、このままでは目標とする投影像が露光されなくなる。また、大気圧等の環境条件の変化によっても結像特性が変化する。このような結像特性の変動を避けるために、本例の投影露光装置には露光光ILの照射量や環境条件の計測機構、及び投影像の結像特性の補正機構が組み込まれている。

【0039】[露光光の照射量の計測機構] 先ず、露光光ILの照射量の計測機構の一部が試料台21上の照射量モニタ28である。照射量モニタ28は実際に投影光学系16を通過した露光光ILの光量を測定できるように構成されており、投影光学系16の像面の位置（ベストフォーカス位置）が変化しても、ウエハステージ22をZ方向に駆動することで、照射量モニタ28の受光面をそのベストフォーカス位置に位置決めできるようになっている。照射量モニタ28としては、シリコンフォトダイオードやフォトマルチプライアを使用できる。なお、本例ではウエハステージ22上に照射量モニタ28が設置されているが、ウエハステージ22上には集光光学系のみを組み込み、この集光光学系で集光された露光光をリレー光学系、又は光ファイバ等を介して、外部の照射量モニタ28に導くようにしてもよい。この場合、照射量モニタ28をウエハステージ22上に設置しなくても済むため、照射量モニタ28の発熱によるウエハステージ22の位置決め精度等の悪化を防ぐことができる。

【0040】また、本例において、ウエハ20で反射された露光光1Lは、投影光学系16、レチクル14、及びコンデンサレンズ13等を経てビームスプリッタ7に戻り、ビームスプリッタ7で反射された光束が光電検出器よりなる反射率センサ9に入射し、反射率センサ9の検出信号が主制御系34に供給されている。主制御系34は、反射率センサ9の検出信号よりウエハ20の反射率を算出する。照射量モニタ28で計測される露光光1Lの照度（パルスエネルギー）と、この照度に反射率センサ9を介して検出される反射率を乗じて得られる照度との和より、投影光学系16を通過する露光光1Lの単位時間当たりのエネルギーが求められる。

【0041】更に、例えば図1において、投影光学系16を通過した光量を照射量モニタ28を用いて計測する場合、途中にレチクル14が配置されているため、レチクル14の透過率変動の影響も受けてしまう。このレチクル14の透過率変動の影響を避けるために、レチクルステージ15上には透過窓が設けられている。即ち、図5に示すように、レチクルステージ15上でレチクル14を走査方向（Y方向）に挟む2箇所に貫通孔よりなる光透過窓55及び56が形成されている。そして、ウエハステージ22側で露光領域内に照射量モニタ28を配置しておき、レチクル14をY方向に走査する場合には、+Y方向側の光透過窓55が露光光の照明領域にあるときに、照射量モニタ28の検出信号を取り込み、レチクル14を-Y方向に走査する場合には、-Y方向側の光透過窓56が露光光の照明領域にあるときに、照射量モニタ28の検出信号を取り込むことで、レチクル14を介することなく、投影光学系16を通過した光量を検出できる。

【0042】また、レチクルステージ15上で光透過窓56の近傍に光電検出器よりなる照度センサ57が設置され、この照度センサ57の近傍にレチクル14上での照明領域よりも大きい面積の基準反射板58が設置されている。照度センサ57の検出信号は図1の主制御系34に供給されており、照度センサ57によってレチクル14上での露光光1Lの照度を高精度に検出できる。一方、基準反射板58を露光光1Lの照明領域に設置した状態で、図1の反射率センサ8の検出信号を取り込むことによって、レチクル14や投影光学系16の透過率変動の影響を受けることなく、ビームスプリッタ7以降の照明光学系の透過率変動を計測できる。

【0043】なお、図5の照度センサ57としても、シリコンフォトダイオード、又はフォトマルチプライア等が使用できる。そして、照度センサ57についても、レチクルステージ15上には集光光学系のみを組み込み、この集光光学系で集光された露光光をリレー光学系、又は光ファイバ等を介して、外部の照度センサ57に導くようにしてもよい。この場合、照度センサ57をレチクルステージ15上に設置しなくても済むため、照度セン

サ57の発熱によるレチクルステージ15の位置決め精度等の悪化を防ぐことができる。

【0044】更に、環境条件の計測機構として、図1において、先ず、投影光学系16の内部（鏡筒の内側）には気圧センサ29が設けられており、気圧センサ29の計測値が主制御系34に供給されている。また、投影光学系16の近傍に設けられた温度センサ30、気圧センサ31、及び湿度センサ32によってそれぞれ計測される投影光学系16を囲む気体の温度、気圧、及び湿度の情報も主制御系34に供給されている。

【0045】〔結像特性の補正機構〕次に、本例の結像特性の補正機構につき説明する。図1において、投影光学系16の内部には結像特性補正部18が設けられ、主制御系34が結像特性制御部19を介して結像特性補正部18を構成する所定のレンズを変位させることによって、所定の結像特性が補正できるように構成されている。以下では、結像特性補正部18の構成につき図2を参照して説明する。

【0046】図2は本例の投影露光装置の投影光学系16の内部構成を示し、この図2において、投影光学系16を構成する複数のレンズ群内の5個のレンズ群36～40が、対応する圧電素子（ピエゾ素子等）等からなる伸縮自在の駆動素子42～46によって駆動できるように支持されている。駆動素子42～46は、それぞれ3個の駆動素子より構成され、対応するレンズ群36～40を投影光学系16の光軸方向に移動できると共に、その光軸に垂直な面に対して傾斜させることができ、これによって対応する結像特性が変化する。図1の主制御系34から所定の結像特性の補正量の情報が結像特性制御部19に供給されると、結像特性制御部19では対応する駆動素子42～46をその補正量に応じた量だけ駆動する。これによって、その所定の結像特性が補正される。

【0047】この場合、レチクル14側の2つのレンズ群36、37は駆動素子43によってまとめて駆動することができるよう構成され、ウエハ20側の3つのレンズ群38、39、40は各レンズ群が単独で駆動でき、それぞれ1つのレンズ群の駆動でその上側及び下側の2つのレンズ群に対する間隔を同時に変更できる構成となっている。この方式では、レンズ群36～40の駆動量が全体として減少できるという利点がある。なお、各レンズ群36～40の駆動量と結像特性の変化量との関係から、上の2つのレンズ群36、37をまとめて駆動する方式の代わりに、下の2群（例えばレンズ群39、40）をまとめて駆動する方式を採用してもよく、どちらの方式を採用するかは、補正する上での各レンズ群36～40の駆動量と各レンズ群36～40に要求される位置安定精度とから決定すると良い。更に、投影光学系16内のウエハ20側には、駆動素子47によって駆動できるように平行平板41が設置されており、結

像特性制御部19が平行平板41のZ方向の位置や傾斜角を制御することで主に偏心コマ収差が補正される。そして、投影光学系16のレチクル14側には、投影光学系16の全系が持っている収差の内でも特にディストーション（歪曲収差）の非回転対称成分を補正するために、表面に微妙な凹凸が形成された平行平板35が設置されている。

【0048】ここで、レンズ群36～40を代表して、レンズ群36の駆動方法につき図3を参照して説明する。図3は、図2の投影光学系16内のレンズ群36を示す平面図であり、この図3において、レンズ群36は不図示の金属製のレンズ枠内に保持され、このレンズ枠は3個の駆動素子42a、42b、42cを介して、その下のレンズ群のレンズ枠上に載置されている。駆動素子42a～42cは、図2では1つの駆動素子42で表されている。この場合、3個の駆動素子42a～42cを互いに独立にZ方向に伸縮させることによって、レンズ群36のZ方向（光軸方向）への駆動、及び傾斜が行われる。

【0049】また、駆動素子42a～42cが配置されている位置（駆動点）には、不図示の位置センサが配置され、これらの位置センサで検出される駆動素子42a～42cの伸縮量の情報が結像特性制御部19に供給され、結像特性制御部19では検出される伸縮量が目標値になるようにクローズドループ方式で駆動素子42a～42cを駆動する。位置センサとしては、例えば静電容量型のギャップセンサ、光学式や磁気式のリニアエンコーダ、又は干渉計等が使用できる。

【0050】図2に戻り、投影光学系16内のレンズ群36～40、平行平板41、及び平行平板35のそれぞれのZ方向の位置、及び傾斜角の組み合わせを変更することにより、種々の結像特性を所定の状態に補正することができる。なお、本例のようにレチクル14に近い位置に平行平板35を設置する場合には、レチクル14を透過した露光光は、瞳面（レチクルのパターン面に対する光学的フーリエ変換面）付近と異なり平行平板35の位置では分かれている。そのため、投影光学系16が縮小投影光学系である場合には、加工精度を緩くできるという利点がある。逆に、投影光学系16が等倍投影光学系ならば、レチクル14側とウエハ20側とのどちらに平行平板35を設置しても良く、投影光学系16が拡大投影光学系である場合には、ウエハ20側に平行平板35を設置することで同様の効果が得られる。

【0051】また、本例では各レンズ群36～40、及び平行平板35、41を駆動することにより結像特性を補正しているが、投影光学系16の内部の一部のレンズ間の空間を密封して内部圧力を変更することにより結像特性を補正する機構を採用しても良い。即ち、図1において、投影光学系16内の所定の空間18A内の気体

の圧力を結像特性制御部19Aによって制御することによって、倍率等の結像特性を補正するようにしてもよい。また、レンズ間の内部圧力を制御する機構と、上記のようにレンズ又は平行平板を駆動する機構とを組み合わせ使用してもよい。更に、レチクル14のZ方向の位置や傾斜角を制御する機構を組み合わせてもよい。なお、レンズ間の内部圧力を制御する機構を用いて像面湾曲、特にベッツバール像面を調整することができる。

【0052】[レチクルの熱変形量の計算方法] 上記のように、本例では露光光の照射量の計測機構が設けられている。この計測結果に応じて結像特性を補正するためには、その露光光の照射量に応じたレチクル14の熱変形量、及びそれに伴う結像特性の変動量を計算する必要がある。そこで、レチクル14の熱変形量の計算方法について説明する。レチクル14の熱変形は、レチクル14の温度分布に依存して発生する。そこで、熱変形量を計算するために、レチクル14の或る時点における温度分布を求める。この温度分布を計算する方法として、レチクル14を所定の有限な要素に分解し、各点の温度変化を差分法、又は有限要素法等により計算する方法がある。本例では比較的単純な差分法を用いて計算を行う。

【0053】図6はレチクル14のパターン領域61を走査方向（Y方向）に5分割、非走査方向（X方向）に4分割、即ち、5×4個の20ブロックに分割した状態を示し、この図6において、分割されたブロックをブロックB1～B20とし、また、各ブロックB1～B20の中心点をP1～P20とする。なお、分割数、及び計算方法の選択は最終的に必要な精度やコンピュータの計算速度等から決定すればよく、本例ではパターン領域61を便宜的に20分割したに過ぎない。

【0054】更に、レチクル14のブロックB1～B20が互いに同一な照度で照明された場合であっても、レチクル14に吸収される熱量はパターン存在率の分布によりブロックB1～B20ごとに異なる。このため、レチクル14上のブロックB1～B20ごとにパターン存在率を求める必要がある。但し、吸収される熱量は各ブロック内においては均一であると仮定する。

【0055】各ブロックB1～B20内のパターン存在率は、図1のインテグレートセンサ8と試料台21上の照射量モニタ28との出力比から求められる。そのためには先ず、図6のレチクル14と同じ形状でパターンの全く描かれていないレチクル（テストレチクル）を、ブロックB1～B4の走査方向の中心が露光光ILの照明領域の中心（本例では投影光学系16の光軸AX）にほぼ合致するように位置決めする。次に、図1のウエハステージ22を移動させて、照射量モニタ28の中心を投影光学系16による露光領域のほぼ中心に送り込む。照射量モニタ28はウエハ20上に照射される露光光を全て受光して光電検出する必要があるため、照射量モニタ28の受光面は投影光学系16の露光領域より若干大き

くなっている。そして、そのテストレチクル等を介して試料台21上に到達する露光光の照射量を測定する。

【0056】その後、駆動系11を介してレチクルブラインド10の開口部の形状を変更して、ブロックB1だけを照明するようにして、照射量モニタ28の出力を測定する。これと同時にインテグレートセンサ8の出力も測定する。以下、レチクルブラインド10の開口部の形状を変更して、順次ブロックB2～B4のそれぞれを照明し、各ブロックB2～B4を照明した状態で、照射量モニタ28及びインテグレートセンサ8の出力を測定する。その後、レチクルステージ15を駆動して、図6の次列のブロックB5～B8の中心を露光光の照明領域の中心付近に位置決めし、レチクルブラインド10を介して順次ブロックB5～B8を照明してそれぞれ照射量モニタ28及びインテグレートセンサ8の出力を測定する。更に、同様の測定を次列以降のブロックB9～B12, B13～B16, B17～B20においても実行する。

【0057】次に、実露光用のパターンを描かれているレチクル14についても、上述のテストレチクルと同様の測定を繰り返し、各ブロックB1～B20毎に照射量モニタ28及びインテグレートセンサ8の出力を測定する。そして、パターンの描かれていないテストレチクルでの照射量モニタ28の出力とインテグレートセンサ8の出力との比、及びパターンの描かれているレチクル14での照射量モニタ28の出力とインテグレートセンサ8の出力との比に基づいて、レチクル14上のパターン存在率をブロックB1～B20毎に求める。

【0058】なお、本例ではパターン存在率測定において、パターンの全く描かれていないテストレチクルを使用した、レチクルステージ15上にレチクル14の無い状態で、照射量モニタ28とインテグレートセンサ8との出力比を求めても良い。この場合、テストレチクルを準備する必要がないため、露光工程のスループットが向上し、更に製造コストも低下するという利点がある。

【0059】また、本例ではレチクルブラインド10の開口部の幅をそれぞれブロックB1～B20の大きさに合わせてから測定しているが、照射量モニタ28をブロックB1～B4の大きさに4分割して独立に光量をモニタできる構成としておき、レチクルブラインド10の開口部をブロックB1～B4の全部を照明できる大きさに広げて、4分割された照射量モニタを用いて、同時に4つのブロックB1～B4の光量を測定しても良い。なお、インテグレートセンサ8はレチクル14より露光光源1側にあり、レチクル14のパターンの影響を受けないため、ブロックB1～B4においてインテグレートセンサ8の出力は同じ値を用いても問題はない。

【0060】更に、インテグレートセンサ8の受光面を投影光学系16の瞳面と共役な位置に配置することで、よりレチクル14のパターンの影響を受け難くすること

もできる。この場合、インテグレートセンサ8の受光面積は露光光の全てを受光できるだけの大きさを確保する必要は無く、これによって照明光学系全体の大きさを小さくできる。

【0061】また、レチクル14のパターン存在率は、レチクル14を交換するごと測定しても良いし、予めレチクル14の製造時等に測定しておき主制御系34に記憶させても良い。この場合、露光時のスループットの低下を防ぐことができる。そして、レチクル14を分割する各ブロックB1～B20の面積が等しい場合、照射量モニタ28の受光面の面積を各ブロックの面積に相当する大きさとし、パターン存在率を求める際にウエハステージ22を介して照射量モニタ28をステップ移動させることによって、レチクル14の全面の透過光量を測定するようにしても良い。この方式では、ウエハステージ22を小型化できるという利点がある。

【0062】続いて、各ブロックB1～B20のパターン存在率に基づいて各ブロックの熱吸収量を計算する。各ブロックは露光光ILの照度（露光光源1のパワーに比例する）とパターン存在率とに比例して熱量を吸収する。吸収された熱量は空气中、あるいはレチクルステージ15へ放射や拡散によって移動する。また、各ブロック間においても熱移動が生じる。先ず、2つの物体間における熱移動を考える。この場合の熱移動は、基本的に2つの物体間の温度差に比例する。また、熱移動に伴う温度変化の变化率は熱量の移動量に比例する。これらを式で表すと以下のようになる。

【0063】

$$\text{【数1】 } \Delta Q = k_1 \cdot (T_1 - T_2),$$

$$(dT_1) / (dt) = -k_2 \cdot \Delta Q,$$

$$(dT_2) / (dt) = k_3 \cdot \Delta Q$$

但し、 ΔQ は移動した熱量、 T_1 , T_2 は各物体の温度、 t は時間、 k_1 , k_2 , k_3 は比例係数である。以上より、次の式が成り立つ。

【0064】

【数2】

$$(dT_1) / (dt) = -k_4 \cdot (T_1 - T_2),$$

$$(dT_2) / (dt) = k_5 \cdot (T_1 - T_2)$$

但し、 k_4 , k_5 は比例係数である。上記の式は一次遅れ系を表すものであり、 T_1 と T_2 とに温度差がある場合、両者はエクスポネンシャルカーブを描きながら一定の温度に達する。上式に基づいて、レチクル14の温度分布を計算する。

【0065】初めに、図6のブロックB1に注目すると、ブロックB1は隣接するブロックB2, B5と熱のやり取り（熱伝導）を行う。また、ブロックB1は周辺の空気やレチクルステージ15とも熱の受け渡しを行うが、簡単のため、空気の温度及びレチクルステージ15の温度の変化量は、各ブロックB1～B20の温度の変化量に比べて非常に小さく、空気及びレチクルステージ

15の温度は常に一定であるとする。そして、各ブロックB1～B20の温度を $T_1 \sim T_{20}$ 、空気温度を T_0 、レチクルステージ15の温度を T_H とすると、ブロックB1に関して次式が成り立つ。

【0066】

$$[数3] \quad (dT_1)/(dt) = k_{12} \cdot (T_2 - T_1) + k_{15} \cdot (T_5 - T_1) + k_H \cdot (T_H - T_1) + K_0 \cdot (T_0 - T_1) + k_p \cdot \eta_1 \cdot P \cdot D_1$$

ここで、 k_{12} 、 k_{15} は各々ブロックB1とB2との間、及びブロックB1とB5との間の熱の伝導を表す係数、 k_H はブロックB1とレチクルステージ15との間の熱の伝導を表す係数、 K_0 は各ブロックB1～B20と空気との熱の伝導を表す係数である。また、 η_1 はブロックB1のパターン存在率、 P は露光光源1のパワーであり、インテグレートセンサ8の出力に対応している。 D_1 はブロックB1内において照明光により照明されている部分の割合を表す係数で0～1の値をとる。ブロックB1全面に照明光があたっているときは $D_1 = 1$ であり、後は露光に応じてレチクル14の位置がずれるに従*

$$\begin{aligned} (d\Delta T_1)/(dt) &= k_R \cdot (\Delta T_2 - \Delta T_1) + k_R \cdot (\Delta T_5 - \Delta T_1) \\ &\quad + k_H \cdot (-\Delta T_1) + K_0 \cdot (-\Delta T_1) + k_p \cdot \eta_1 \cdot P \cdot D_1 \\ &= (-2 \cdot k_R - k_H - K_0) \cdot \Delta T_1 + k_R \cdot \Delta T_2 \\ &\quad + k_R \cdot \Delta T_5 + k_p \cdot \eta_1 \cdot P \cdot D_1 \end{aligned}$$

上記の式をブロックB1～B20について各々求めて、マトリクス表現で表すと次式ようになる。以下の式で $P_1 \sim P_{20}$ は、それぞれブロックB1～B20に対する露光光源1のパワーであり、 $\Delta T_1 \sim \Delta T_{20}$ は、それ※

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta T_1}{dt} \\ \frac{d\Delta T_2}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\Delta T_{20}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \cdot k_R - k_H - K_0 & k_R & 0 & 0 & k_R & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ k_R & -3 \cdot k_R - K_0 & k_R & 0 & 0 & k_R & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & -2 \cdot k_R - k_H - K_0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \vdots \\ \Delta T_{20} \end{bmatrix}$$

$$+ k_p \cdot \begin{bmatrix} \eta_1 \cdot P_1 \cdot D_1 \\ \eta_2 \cdot P_2 \cdot D_2 \\ \vdots \\ \eta_{20} \cdot P_{20} \cdot D_{20} \end{bmatrix}$$

【0070】これは一階の微分方程式の20元連立方程式であり、数値解析により解くことができる。また、微分の形を或る微小時間（コンピュータの計算周期）の値として差分形式で表現して解くこともできる。計算周期はコンピュータの能力と必要精度とから決めれば良い。計算周期が必要精度に対して粗い場合には、係数 $P_1 \sim P_{20}$ と係数 $D_1 \sim D_{20}$ とを計算周期の間の平均値として記憶しておく必要がある。係数 $P_1 \sim P_{20}$ を計算する際には、逐次インテグレートセンサ8の出力を測定して露★50

*いブロックB1の面積中で照明されている面積の割合に応じて D_1 が徐々に減っていき、ブロックB1が照明領域外に出たとき、 $D_1 = 0$ となる。もちろん、照明されていないときにも $D_1 = 0$ となる。 D_1 の値はレチクルステージ15の位置、及びレチクルブラインド10の開口面積から計算により求められる。 k_p は照明光を各ブロックが吸収した熱量と η_1 、 P とを関係づける係数である。上述の式の最後の項は照明光から吸収する熱量を示しており、その他の項は分散する熱量を示している。

【0067】ここで、 T_H 、 T_0 は一定であり、 $T_H = T_0$ として各ブロックB1～B20の温度は $T_0 + \Delta T_1$ から $T_0 + \Delta T_{20}$ で表せる。更に、レチクル14上の各ブロックはともに同じ材質（通常石英であることが多い）であるため、 k_{12} 、 k_{15} 等の隣接するブロック間における熱の伝導を表す係数は、全て等しいことを考慮に入れると、(数3)は以下の式で表せる。

【0068】

【数4】

※それブロックB1～B20の温度変化量である。

【0069】

【数5】

★光光源1のパワー変動を測定することによって、計算精度を向上できる。また、計算周期が必要精度に対して十分細かい場合には、係数 $P_1 \sim P_{20}$ 及び係数 $D_1 \sim D_{20}$ として、計算する瞬間の値を使用すると良い。この場合、平均値として記憶する必要がないので、プログラムが単純化でき、コンピュータのメモリを節約できるという利点がある。

【0071】また、外力の項（露光光から吸収する熱量）は最後の項になるので、単位時間ごとの各ブロック

21

B1～B20の係数の値、即ち η_1 , P_1 , D_1 , η_2 , P_2 , D_2 ..., η_{20} , P_{20} , D_{20} の値から各時間ごとの $\Delta T_1 \sim \Delta T_{20}$ の値を求めることができる。パターン存在率 $\eta_1 \sim \eta_{20}$ の値は実測によって得られ、入射光量 $P_1 \sim P_{20}$ はインテグレートセンサ8及び照射量モニタ28を用いて求めることができる。また、各係数 k_R , k_0 , k_H , k_D はレチクル14の物性、空気の物性、空気の流速等から計算により求めることができる。あるいは、種々のレチクルに関して実験を行い、各係数が現実に最も良く合うように決定しても良い。

【0072】求めたレチクル14の温度分布 $\Delta T_1 \sim \Delta T_{20}$ とレチクル14（石英ガラス）の膨張係数とより、各ブロックB1～B20の中心点P1～P20の相互の距離の変化を求めることができ、レチクル14上の各点の変位を決定することができる。これに基づいて、結像特性の変動、例えばウエハ20上に投影される像の歪み等を計算することができる。

【0073】なお、レチクルによって空気との間の熱の伝導を表す係数等が異なる。これはレチクルの表面の薄膜の特性（反射率や熱伝達、熱伝導係数等）や防塵のために装着したベリクル（防塵膜）による熱移動の変化があり、且つレチクルの材質が異なる場合があるためである。従って、複数のレチクルで同一の熱の伝導を表す係数等を使用できない場合には、予め熱の伝導を表す係数等を数種類記憶しておいて、レチクルに応じて使い分ければ良い。

【0074】なお、本例ではレチクル14の周辺を空気として計算しているが、別の流体に関しても同様の手法を適用できる。別の流体として窒素を用いた場合には、露光光源1がArFエキシマレーザ光源等の場合にオゾンの発生が防止される、即ち酸素による露光光の吸収が無くなるという利点がある。また、ヘリウムを用いた場合には、オゾン発生を防ぐ効果に加えて、空気や窒素に比べて屈折率が小さいことから、気圧が変化したときの投影光学系16の結像特性の変化量を低減する効果もあり、結像特性補正部18の駆動量を小さくできる。

【0075】また、本例では一旦レチクル14の温度分布 ΔT を求めてから、各ブロックの中心点Pの動きを求め、ひいては像歪みを求めるという手法をとったが、 ΔT の代わりに直接像歪み（ディストーション、像面湾曲等の結像特性）を計算することもできる。この場合、各係数 k_R , k_0 , k_H , k_D を実験により求めるため、レチクル14の撓みによる変形等も計算に含まれる。また、レチクル14の熱伝導性が非常によく、且つレチクル14の一部のみにパターンがある、あるいは一部のみ露光光が照射される場合でも、レチクル14が一様に膨張すると考えても精度上問題がなければ、上述のような複雑な計算は必要がなく、より単純な計算により像歪みを計算しても良い。

【0076】〔レチクルの熱変形量の各成分への分解〕

22

次に、求めたレチクル14の各ブロックB1～B20の中心点P1～P20の移動量を各成分に分解する。図7は、レチクル14のY座標と分解された熱変形量の各成分との関係の一例とそれに応じた補正量とを示し、この図7(a)～(g)において、横軸はレチクル14の走査方向の位置（Y座標）を表し、縦軸はY座標に対応するレチクル14の各熱変形量、又は補正量を表しており、点線の曲線C1～C7がそれぞれ変形量の計算値を表し、実線の曲線D1～D7がそれぞれ対応する補正量を表している。図7(a)のX倍率1は、図6の外側の中心点P1とP4とのX方向への移動量から算出される倍率変化量、図7(b)のX倍率2は、内側の中心点P2とP3とのX方向への移動量から算出される倍率変化量である。また、図7(c)のX倍率傾斜1は、外側の中心点P1とP4とのX方向への移動量の差から算出される値、図7(d)のX倍率傾斜2は、内側の中心点P2とP3とのX方向への移動量の差から算出される値である。

【0077】レチクル14のパターン存在率の分布に偏りがある場合、例えばブロックB1, B2でパターン存在率が大きく、ブロックB3, B4でパターン存在率が小さい場合には、レチクル14の熱変形量はブロックB3, B4側で大きくなり、X方向の倍率に偏りが現れる。また、図7(e)のYシフトは、図6の中心点P1～P4の平均的なY方向への移動量、図7(f)の回転は、中心点P1～P4のY方向への移動量と各像高の関係とを直線近似することで求められる回転角、図7(g)のXシフトは、中心点P1～P4の平均的なX方向への移動量を表している。上述の各成分は、レチクル14を計算上でY方向に順次所定ステップ量だけ移動するごとに算出される。

【0078】〔各成分の走査方向の位置に応じた関数化〕次に、求めた各成分をY座標の関数で近似する。ここでは、簡単のため図7(a)のX倍率1についてのみ述べる。図8は、Y座標の各位置で求められたX倍率1の値 ΔX の例を示し、この図8において、Y方向の計測点の個数を n （ n は2以上の整数で、本例では $n=5$ ）、 i 番目の計測点のY座標を y_i （ $i=1 \sim 5$ ）、位置 y_i でのX倍率1を Δx_i とする。このとき、Y座標の値を y として、Y座標に対応したX倍率1の値を $f(y)$ と定義する。そして、X倍率1の値 $f(y)$ を、次のように n 個の係数 a_i （ $i=0 \sim n-1$ ）を用いてY座標の値 y の $(n-1)$ 次関数で表し、計算された n 組の値 $(y_j, \Delta x_j)$ を用いてそれらの係数 a_i の値を決定する。

【0079】

【数6】

$$f(y) = \sum_{i=0}^{n-1} (a_i \times y^i)$$

【0080】即ち、(数6)において、計算条件は以下

のようになる。

$$\Delta x_j = f(y_j) \quad (j=1 \sim n)$$

本例では、図6に示すように、レチクル14を複数のブロックに分割する際にY方向に5分割しているので、 $n=5$ となり、(数6)は4次関数となっている。その4次関数は、5点での条件から一義的に決定することができる。

【0081】更に(数6)の代わりに使用できる別のモデル関数として、計算条件として5点の中で端点を除く3点についての微分係数を追加した以下の関数を用いて

【0082】

【数7】

$$f(y) = \sum_{i=0}^{2 \times n - 3} (a_i \times y^i)$$

【0083】この場合の計算条件は以下のようになる。

【0084】

$$\Delta x_j = f(y_j) \quad (j=1 \sim n),$$

$$(df(y_j))/dy = (\Delta x_{j+1} - \Delta x_{j-1}) / (y_{j+1} - y_{j-1})$$

この場合も、 $n=5$ である。(数7)は5点を通る7次関数であり、5点を通る条件と、3点の微分係数との計8個の情報からその7次関数は一義的に求めることができる。この関数は上述の5点を通る4次関数より各点において滑らかなものとなる。また、熱変形量の計算精度をより高めるためには、レチクル14のパターン領域外での変形も考慮することが望ましい。

【0085】図9は、レチクル14のパターン領域61の外部にも計算点を設けて計算するモデルを示し、この図9において、パターン領域61の周囲にも計算点67が設けられている。この場合、X倍率1の値 $f(y)$ を表すモデル関数は(数7)と同様に以下のようになる。

【0086】

【数9】

$$f(y) = \sum_{i=0}^{2 \times n - 3} (a_i \times y^i)$$

【0087】但し、図9では、走査方向の計測点(パターン領域61内では各ブロックの中心点)は7個であるため、 $n=7$ である。この関数はパターン領域61内の両端の2つの中心点においても滑らかなものとなる。図7(b)～(g)に示す他の成分についても、同様に各々Y座標の関数として表す。これらの結像特性の関数化された各成分は、図1の主制御系34内の記憶部に記憶され、主制御系34は、一例として記憶された各成分を相殺するようにそれぞれの結像特性を補正する。このように、本例ではレチクル14の熱変形量の各成分をY座標に対する関数としているが、それ程厳しい補正精度が要求されない場合には、レチクル14の熱変形量を計算した座標ごとに不連続に補正しても良い。また、より簡

単に直線補間により関数化しても良い。

【0088】なお、例えばレチクルのパターン領域内の一部の領域のみが露光される場合には、その露光される領域のみの熱変形データを使用してもよい。図10はパターン領域全面を使用せずにその一部の領域のみを露光する場合のモデルを示し、この図10において、レチクル14のパターン領域内の一部の領域62のみが露光されるものとする。この場合、熱変形量の計算は、図6、又は図10のパターン領域61全面を含む計測点で実行されるが、実際に図7の各成分に分解するために使用する熱変形データは、その一部の領域62内の計測点(各ブロックの中心点)の熱変形データのみとする。これによって、結像特性の変動量の計算精度が向上する。即ち、露光される領域62外においても熱の伝導はあるため、パターン領域の全面を含む領域で熱変形量を計算することによって、熱変形量の計算精度が高くなり、次に露光領域62内の計算値のみから結像特性の各成分を求めることによって、高精度な成分分解ができ、結果として高精度に補正を行うことができる。

【0089】また、レチクル14上の露光対象の領域が図11(a)のY方向に細長い部分的な領域63のような場合には、レチクル14の熱変形量の計算点を、図11(b)のように領域63をX方向に1ブロック分ずつ広げた領域64として、各成分を求める場合に領域63内の計測データを使用するようにしてもよい。また、露光対象の領域が図12(a)のようにパターン領域の端部の領域65である場合には、熱変形量の計算点をその領域65を内側に1ブロック分広げた領域66としてもよい。これによって、露光面積が小さい場合には、得られる結像特性の変化量の精度を殆ど低下させることなく、計算量を少なくできる。但し、図12(b)の場合には、パターン領域の外部にも計算点を設けても良い。

【0090】また、通常走査露光装置ではスルーブットを向上させるために、次のショット領域への露光に移行するごとにレチクル14の走査方向を+Y方向から-Y方向へ、又は-Y方向から+Y方向に反転させている。この際に、上述の結像特性を表す関数はY座標に応じた関数であるため、走査方向を切り替えた場合にもそのまま適用することができる。更に、コンピュータで計算する際に上述の関数の値をメモリにY座標の一定間隔ごとに記憶させて、直接Y座標の値は記憶させない方法をとっても良い。この場合、メモリの記憶容量を節約できる利点がある。そして、逆方向に走査する場合には、正方向走査とは読み出す番地の順序を逆にしてメモリから結像特性の各成分を読み出せば良い。次に、結像特性の各成分ごとの補正方法について説明する。

【0091】[X倍率1、X倍率2の補正方法] 図7

(a)、(b)のX倍率1及びX倍率2は、図2の投影光学系16の5つのレンズ群36～40を光軸方向に駆動することで変化させることができる。通常、レチクル

14のX倍率1とX倍率2との比率と、或る一部のレンズ群を駆動したときのX倍率1及びX倍率2と同じ像高の倍率変化量の比率とは一致しないので、同時にX倍率1及びX倍率2を補正するには少なくとも2つのレンズ群を同時に組み合わせて駆動する必要がある。このとき、レンズ群の駆動により他の結像特性（像面湾曲、コマ収差、球面収差）も変化するので、更に他の3つのレンズ群を同時に駆動して、都合5つのレンズ群36～40を駆動することによりX倍率1及びX倍率2を所定の値に変化させて、像面湾曲、コマ収差、球面収差の変動も抑えることができる。なお、X倍率1とX倍率2を補正するときにレンズ群36～40を駆動することにより発生するコマ収差や球面収差が小さく無視してもよい場合には、駆動するレンズ群36～40の数を減らしても良い。また、補正によるX倍率1とX倍率2との中間像高の倍率変化が無視できない場合には、更に駆動するレンズ群を1つ追加し、合計6つのレンズ群の駆動により補正すると良い。

【0092】また、X倍率1とX倍率2とを補正するためにY座標に応じてレンズ群36～40を駆動すると像面の位置（ベストフォーカス位置）が変化する。このようにベストフォーカス位置が変化したときには、図1のAFセンサ26、27からのフォーカス位置の検出結果に基づいて試料台21をZ方向に駆動する際の目標値を補正すればよい。この場合、Y座標に応じて試料台21のZ座標の目標値が変化することがある。なお、フォーカス位置の補正方法としては、レチクル14を光軸方向に上下させる機能を付加して補正しても良い。この場合、投影光学系16として縮小投影系を使用しているときには、光軸方向の位置決め精度が多少粗くても良いという利点がある。

【0093】なお、X倍率1、X倍率2の補正においては、各レンズ群36～40を光軸に平行に駆動させるのが理想的であるが、通常、平行度は製造誤差等により若干ずれている。また、レンズ面にも製造誤差があり、完全に理想的な状態にあるわけではない。従って、各レンズ群36～40を駆動することでレチクル14のパターン像のウエハ20への投影像の位置が若干ずれてしまうことがある。この場合、予め各レチクルにおいてレンズ群36～40の駆動量と像位置のシフト量との関係を実験により求めて記憶しておく必要がある。X倍率1、X倍率2の補正のためにレンズ群36～40を駆動する場合には、記憶しておいた関係から全体のシフト量を求めて、後述するXシフト補正量とYシフト補正量とに加算して補正すればよい。

【0094】〔X倍率傾斜1、X倍率傾斜2の補正方法〕図7(c)、(d)のX倍率傾斜1、X倍率傾斜2は、図2の5つのレンズ群36～40を光軸に対してX方向に（Y軸に平行な軸の周りに）傾斜させることで補正する。通常は、レチクル14のX倍率傾斜1とX倍率

傾斜2との比率と、或る一部のレンズ群を傾斜したときのX倍率1及びX倍率2と同じ像高の倍率傾斜の変化量の比率とは一致しないので、同時にX倍率傾斜1とX倍率傾斜2を補正するには少なくとも2つのレンズ群を同時に光軸方向に傾斜させる必要がある。このとき、レンズ群36～40の傾斜により他の結像特性（像面傾斜、コマの傾斜、球面の傾斜）が変化するので、更に3つのレンズ群を同時に駆動して、都合5つのレンズ群36～40を傾斜させることによりX倍率傾斜1とX倍率傾斜2とを所定の値にした上で、像面傾斜、コマ収差の傾斜、球面収差の傾斜の変化を抑える。

【0095】なお、X倍率傾斜1、X倍率傾斜2を補正するときにレンズ群36～40を傾斜することで発生するコマ収差の傾斜量や球面収差の傾斜量が小さく無視してもよい場合には、傾斜するレンズ群の数を減らしても良い。また、X倍率傾斜1とX倍率傾斜2との中間像高の倍率変化が無視できない場合には、更に傾斜するレンズ群を1つ追加して合計6つのレンズ群の傾斜により各結像特性を補正すると良い。

【0096】なお、コマ収差の傾斜に関しては投影光学系16の先端の平行平板41を傾斜することで補正しても良い。この場合、投影光学系16の先端の平行平板41を傾斜して発生する結像特性の変化はコマ収差の傾斜が大部分を占めるので、独立性の高い補正が可能となり、レンズ群36～40の傾斜量を小さくできる利点がある。

【0097】また、通常レンズ群36～40を傾斜させたときに発生する像面傾斜は、同時に非点収差の傾斜も発生することになるが、この非点収差の傾斜の発生量が小さい場合には、レチクル14とウエハ20との相対的な平行度を変化させて補正しても良い。特に縮小投影系の場合、ウエハ20側を傾斜させる場合には、傾斜させる量が小さくて済む利点があり、レチクル14側で傾斜させる場合には、位置決めが比較的緩くできる利点があり、ウエハ20とレチクル14とを両方組み合わせて傾斜させる場合には、ウエハ20側で傾斜させる量を少なくし、且つレチクル14側で微細な位置決めをすることができる。

【0098】なお、本例では像面傾斜の補正をレンズ群36～40を傾斜することにより行っているが、この補正方法は、露光光が投影光学系16を照射することで像面傾斜が発生した場合や、照明条件（照明系開口絞りの種類、レチクルブラインド10の開口形状、レチクル14のパターン、及び投影光学系16の開口絞り17の開口形状等）を変更することで発生する像面傾斜や、ウエハ20又はレチクル14の平面度が悪い場合に発生する像面傾斜の補正を行う際にも適用することができる。

【0099】また、レンズ群36～40や平行平板41を傾斜することで、レチクル14のパターン像のウエハ20への投影像の位置が若干ずれてしまうことがあ

る。この場合、予めレンズ群36~40の傾斜角と像位置のシフト量との関係を実験により求めて記憶しておく必要がある。X倍率傾斜1、及びX倍率傾斜2の補正でレンズ群36~40を傾斜させる場合には、記憶しておいた関係から全体でのシフト量を求めて、後述するXシフト補正量とYシフト補正量とに加算して補正すればよい。

【0100】[Yシフトの補正方法]図7(e)のYシフトはレチクル14とウエハ20との相対位置をY方向にずらすことにより補正する。通常、レチクル14は露光光吸収によって倍率が大きくなる方向に変化するため、結果的にレチクル14とウエハ20との相対速度をレチクル14のY座標に応じて変更すればよい。具体的に、上述のようにY座標に応じてYシフト量を求め、Y座標に応じてそのYシフト量を相殺するようにレチクル14の走査速度(レチクルとウエハとの速度比)を変更して補正を行う。その補正の際には、図2のレンズ群36~40の駆動や傾斜により発生したYシフト量を含めて補正を行う。

【0101】露光光吸収によりレチクル14がY方向に膨張したようにYシフトが発生しているときは、レチクル14の走査速度を高速にし、その逆の場合は、レチクル14の走査速度を低速にする。なお、レチクル14の走査速度の変更前後でウエハ20の走査速度は変更されず、レチクル14とウエハ20との走査速度比が変更される。また、ウエハステージ22でYシフトを補正しても良い。この場合、レチクル14がY方向に膨張したようにYシフトが発生しているときには、ウエハステージ22の走査速度を低速にし、その逆の場合には、ウエハステージ22の走査速度を高速にする。

【0102】[回転の補正方法]図7(f)の回転の成分は、レチクル14とウエハ20との相対回転量を変更することで補正する。即ち、図5のレチクルステージ15上の回転機構49によりレチクル14を回転すればよい。このとき、図6においてレチクル14のブロックB1~B4が照明されているときは、照明領域に対してブロックB1~B4の中心点P1~P4が走査方向に対して垂直になるようにY座標に応じて回転量を制御する。なお、ウエハ20側で回転を補正しても良い。この場合には、ウエハステージ22側にも回転機構(不図示)を設けておき、この回転機構によりウエハ20を回転させることになる。

【0103】[Xシフトの補正方法]図7(g)のXシフトは、レチクルステージ15をX方向にずらすことで補正する。その際、レンズ群36~40の駆動や傾斜により発生したXシフト量を含めて補正する。このとき、レチクル14のブロックB1~B4が照明されている際には、照明領域に対してブロックB1~B4の中心点P1~P4のXシフト量が照明領域中心でのシフト量となるようにY座標に応じてXシフト量を制御する。なお、

ウエハ20側でXシフトを補正しても良い。この場合には、Xシフトと同じ量だけウエハ20をX方向にずらすようにすればよい。

【0104】[投影光学系の結像特性の変化量の計算方法]次に、図1の投影光学系16の結像特性の測定、及び計算方法について説明する。そのために、先ず、ウエハ20の反射率Rを求める。ウエハステージ22上の試料台21上には矩形の露光領域を覆う大きさを備え、それぞれ反射率がRH及びRL(RH>RL)である2つの反射板(不図示)が設置してある。そして、レチクル14をレチクルステージ15上に設置した状態で、ウエハステージ22を駆動して反射率RHの反射板を投影光学系16の露光領域に移動する。次に、照明条件(照明系開口絞りの種類、レチクルブラインド10の開口形状、レチクル14のパターン、及び投影光学系16の開口絞り17の開口形状等)を所定の状態に設定した上で、レチクル14を所定の距離だけY方向に移動させながら反射率センサ9の出力VHを測定する。次に、ウエハステージ22を駆動させることにより反射率RLの反射板を投影光学系16の露光領域に移動して、レチクル14を所定の距離だけY方向に移動しながら反射率センサ9の出力VLを測定する。

【0105】図13は、計測されるウエハ20の反射率と反射率センサ9の出力との関係を示し、この図13において、横軸は計測される反射率Rであり、縦軸は反射率センサ9の出力Vである。この図13に示すように、上述の2回の反射率の測定結果(RH, VH)及び(RL, VL)を直線で結ぶことによって、レチクル14のY座標ごとに反射率Rと反射率センサ9の出力Vとの関係を直線(1次関数)で表すことができる。その後、ウエハ20を露光する際には、反射率センサ9の出力Vを用いて、レチクル14のY座標に応じて図13の直線に対応する以下の式よりウエハ20の反射率Rを算出する。

【0106】

【数10】

$$V = \frac{VH - VL}{RH - RL} \times R + \frac{VL \times RH - VH \times RL}{RH - RL}$$

【0107】なお、本例ではY座標に応じて反射率Rを別々の直線関係から求めたが、例えばそれ程高い計算精度が要求されない場合には、レチクル14のY座標に応じて反射率Rを計算する必要はなく、走査中の平均的な反射率を算出する方法を採っても良い。即ち、2つの反射板の反射率を測定する際に、反射率と反射率センサ9の出力との関係を、Y座標ごと求めるのではなく走査中の平均値とすることによりY座標に依存しない関係を得ることができる。この場合、Y座標に応じた反射率センサ9の出力を記憶しておく必要がないという利点がある。

【0108】続いて、露光光吸収による投影光学系16

の結像特性の変化を求める。先ず、図1のウエハステージ22を駆動して照射量モニタ28を投影光学系16の露光領域に移動する。レチクル14をレチクルステージ15上に設置し、照明条件（照明系開口絞りの種類、レチクルブラインド10の開口形状、レチクル14のパターン、及び投影光学系16の開口絞り17の開口形状等）を所定の状態にして照射量モニタ28を照明し、そのときの照射量モニタ28の出力 P_{ow} とインテグレートセンサ8の出力 I_o とを記憶する。そして、露光を行う際に、インテグレートセンサ8の出力 I と反射率センサ9から求めた反射率 R とを用いて以下の式より計算を行えばよい。

【0109】

【数11】

$$M_h = P_{ow} \times (1 + R) \times K_m \times \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T_m}{t}\right) \right\} \times \frac{I}{I_o}$$

【0110】但し、 M_h 、 K_m 、及び T_m は、それぞれ露光光吸収による投影光学系16の倍率変化量、倍率変化係数、及び時定数である。インテグレートセンサ8の出力 I には露光光源1の照射量の経時変化を測定する役割と、投影光学系16に露光光が入射しているかどうかを判定する役割との2つの役割がある。なお、露光光源1の照射量の経時変化を測定するために、図5のレチクルステージ15上の光透過窓55、56を用いて、1ショット露光するごとに光透過窓55、56のどちらかをレチクルステージ15を駆動して照明領域内に移動し、ウエハステージ22を駆動して照射量モニタ28を露光領域に移動して、照射量モニタ28により露光光源1の照射量を測定するようにしても良い。この場合、レチクル14のY方向の両側に光透過窓55、56があるので、走査露光後に、露光時のレチクル14の走査方向がY軸に対して正逆方向のどちらであっても、走査を継続したまま光透過窓55、56を照明領域内に移動できるため、1ショットの露光終了から露光光源1の照射量測定までの時間が短縮されるという利点がある。更に、その照射量はウエハ20の露光面と同じ位置で測定しているため、図1のビームスプリッタ7からコンデンサレンズ13までの光学系、及び投影光学系16の透過率や反射率の変化による露光光源1からウエハ20までのエネルギー到達割合の変化を正確に測定できる。

【0111】また、露光光源1の変動時間が1ショットの露光時間に対して十分に長い場合には、光透過窓55、56をどちらか1つのみとして、この光透過窓の方向へレチクル14を走査露光した後でのみ透過率を測定する方法や、ウエハ20の交換時にのみ透過率を測定する方法をとっても良い。この場合、レチクルステージ15を小さくできるのでレチクルステージ15の駆動性や位置決め精度が向上するという利点がある。また、レチクルステージ15の大きさを変更せずに光透過窓55、56をどちらか1つにする場合には、開口部が少なく

りレチクルステージ15全体の剛性が向上するという利点がある。

【0112】また、各結像特性の変化係数、及び時定数については、予め実験により求めておいても良く、熱伝導のシミュレーションにより計算で求めても良い。また、照明条件（照明系開口絞りの種類、レチクルブラインド10の開口形状、レチクル14のパターン、及び投影光学系16の開口絞り17の開口形状等）の変更に依りて結像特性の変化係数と時定数とを変更しても良い。この場合、図4の照明系の開口絞り5a~5dの違いによる微妙な結像特性の変化も高精度に計算することができ。なお、本例では照射熱吸収による結像特性の変化を1次遅れ系としたが、更に高精度な計算をするために2次系やむだ時間系、あるいはそれらを組み合わせた伝達関数を導入しても良い。

【0113】続いて、図1の温度センサ30~湿度センサ32を介して投影光学系16の周囲での気圧、温度、及び湿度を測定し、気圧センサ29を介して投影光学系16の内部の気圧を測定し、これらの測定結果より投影光学系16の倍率変化量を計算し、次式より全体としての結像特性の変化量を求める。

【0114】

$$M = K_{ap1} \times P_1 + K_{ap2} \times P_2 + K_{at} \times T + K_{ah} \times H + M_h$$

但し、 M は投影光学系16の照射による倍率変化量と環境変化による倍率変化量との合計の倍率変化量、 P_1 は投影光学系16の周辺の気圧、 P_2 は投影光学系16内部の気圧、 T は投影光学系16の周辺の温度（これは投影光学系16の温度とみなすことができる）、 H は投影光学系16の周辺の湿度である。更に、 K_{ap1} は投影光学系16周辺の気圧変化に対する倍率変化係数、 K_{ap2} は投影光学系16内部の気圧変化に対する倍率変化係数、 K_{at} は投影光学系16の温度変化に対する倍率変化係数、 K_{ah} は投影光学系16の周辺の湿度変化に対する倍率変化係数である。

【0115】なお、投影光学系16内部に不純物が混入して、レンズ表面が曇ったりすることを防ぐために投影光学系16の内部に乾燥窒素ガス等の流体を循環させる場合がある。この場合、投影光学系16内部と投影光学系16周辺部とで気圧差が生じるため、本例のように、投影光学系16の内部と周辺部とに気圧センサ29、31を2個配置し、例えば投影光学系16の最もレチクル14に近いレンズ面とウエハ20に最も近いレンズ面とは投影光学系16周辺部の気圧センサ31の測定値を用い、それ以外のレンズ面はレンズ内部の気圧センサ29の測定値を用いて、気圧変化による倍率変化量を計算すると良い。

【0116】また、投影光学系16内部に循環させる流体としては空気、窒素、ヘリウム等が選択される。空気は主に不純物混入を避ける目的で選択される。窒素は露

光光源1として短波長のもの(例えばArFエキシマレーザ光源)を使用した際に酸素と反応してオゾンが発生するのを避けるために選択される。ヘリウムは主に投影光学系16の気圧変化による結像特性変化を抑制するために選択される。もちろん、流体に応じて気圧変化に対する倍率変化係数を変更する。

【0117】また、複数のレンズ間の所定の密閉空間(気密室)の圧力を調整して結像特性を変えるようにしても良い。この場合、レンズ群36~40の駆動により補正することのできない像面湾曲を、複数のレンズ36~40間の所定の密閉空間(気密室)の圧力を調整することにより補正することができる。なお、投影光学系16周辺と投影光学系16内部との気圧がほぼ同一であるとみなしても精度上問題なければ、気圧センサ29、31は1つでも良い。また、温度や湿度の投影光学系16の内外での差が精度上問題となる場合には、温度センサ30や湿度センサ32と同じセンサを投影光学系16内にも設置して、上式の温度や湿度の項も気圧と同様に投影光学系16内部と周辺部との2つのセンサの出力を用いて計算すればよい。

【0118】なお、本例では結像特性の変動量を各環境の変動量に対して比例するとして求めているが、より高精度に結像特性を求めるために、例えば温度に対して1次遅れ系や熱の移動を考慮したむだ時間系、あるいはそれらの組み合わせの伝達関数を採用しても良い。温度、湿度、気圧変化による結像特性の変化量を計算できるモデルであればどのようなモデルでも良い。

【0119】以上により投影光学系16の倍率変化量を求められる。更に、同様の手法により他の各結像特性の変化を求めることができる。本例では結像特性として2つの像高での倍率変化量 C_1 、 C_2 、コマ収差の変化量 C_3 、球面収差の変化量 C_4 、及び像面湾曲 C_5 の変化量について計算する。なお、照明条件を変更した場合、照射による投影光学系16の結像特性の変化量の計算における倍率変化量や時定数が変化するため、予め、各種*

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix}$$

【0123】但し、 b_{ij} ($i, j=1\sim5$)は各レンズ群を駆動した場合の結像特性の変化量を表す係数である。これらの係数は光学計算値を使用しても良く、実験的に求めても良く、結像特性の変化量を相殺するように各レンズ群が駆動される。なお、投影光学系16の結像特性の変化量の中で1つの結像特性の変化量が小さく補正する必要がない場合には、(数13)のマトリクスを4行×4列に縮小して計算しても良い。また、本例では倍率変化量を2つの像高で計算することによりディスト※50

*照明条件に応じて、倍率変化量と時定数とを実験的に求めておいて記憶しておくこととする。露光の際には、照明条件の変更に応じて倍率変化量と時定数とを変更して計算すればよい。また、照明条件変更によって各結像特性の変化量 $C_1\sim C_5$ のオフセットも変化するため、各種照明条件における各結像特性の変化量 $C_1\sim C_5$ のオフセットを予め実験的に求め記憶しておき、露光の際に照明条件に応じて各結像特性の変化量のオフセットを各結像特性の変化量 $C_1\sim C_5$ に加えて補正する。なお、ベストフォーカス位置の補正に関しては上記のようにAFセンサ26、27を含むオートフォーカス機構でそのオフセット分を加算して補正すればよい。

【0120】なお、照明条件を変更した場合、上述の結像特性の補正では十分に補正できないものがある。例えば、投影光学系16の製造誤差等により発生する比較的高次の、又はランダムな形状のディストーションである。これは、投影光学系16のレチクル14寄りにある所定の凹凸加工が施された平行平板35を照明条件変更に応じて切替えることにより補正することができる。このため、投影光学系16の平行平板35は照明系の開口絞り5a~5dと同様に複数種類切り換えられるようにすると良い。なお、このディストーション補正にはレチクル14寄りに平行平板35を配置することが望ましいが、平行平板35の設置場所は、レチクル14寄りに限定するものではなく、ウエハ20側でもあるいは投影光学系16の瞳面付近でもレチクル14からウエハ20の間ならば良く、設置場所により補正できる結像特性が変更できる。

【0121】[結像特性を補正するための各レンズ群の駆動方法]次に、レンズ群36~40の駆動による各結像特性の変化量 C_i から以下の連立方程式を解いて、補正に要する各レンズ群36~40の駆動量 L_i を求め

【0122】

【数13】

*—ションの変化量を抑えることとしているが、補正する倍率の像高を更に増やし、更に細かくディストーションを補正するようにしても良い。例えば合計3つの像高での倍率変化量を補正する場合、駆動するレンズ群を1つ追加し、(数13)のマトリクスも6×6に拡張する。

【0124】また、本例では回転対称な結像特性を補正したが、各レンズ群36~40を光軸AX方向に対して傾斜自在な構成としているため、非回転対称な結像特性を補正することもできる。この場合、投影光学系16の

結像特性の変化量を測定及び計算する際に、各結像特性についてX方向、Y方向の傾斜成分も同様の計算により求めて、X方向、及びY方向別に各レンズ群36~40の傾斜角と結像特性変化量との関係から、回転対称な結像特性の変化量の補正と同様に5×5のマトリクスを解いて各レンズ群36~40の傾斜角を求める。なお、結像特性の変化量の程度に応じてそのマトリクスを縮小、又は拡張しても良い。

【0125】[ベストフォーカス位置の補正方法]次に、ベストフォーカス位置の補正方法について説明する。既に一部説明したようにベストフォーカス位置(像面の位置)の変化要因には、照射によるもの、環境変化によるもの、レンズ群36~40の駆動によるもの、及び照明条件の変更によるものの4種類がある。照射熱によるベストフォーカス位置の変化、及び環境変化によるベストフォーカス位置の変化は、それぞれ上述の投影光学系16の倍率変化と同様に計算して求めれば良い。また、各結像特性を補正する際のレンズ群36~40の駆動によるベストフォーカス位置の変化量は、レンズ群36~40の駆動量とレンズ群36~40の駆動量に対するフォーカス変化係数とを各々掛けた値の合計として求められる。照明条件の変化によるベストフォーカス位置の変化は予めその関係を実験的に求めておく必要がある。以上4種類のベストフォーカス位置の変化量を合わせたものが全体のベストフォーカス位置の変化量になり、この変化量がAFセンサ26、27を含むオートフォーカス機構部に送信される。なお、各レンズ群36~40の駆動量とベストフォーカス位置の変化量との関係は、他の結像特性と同様に、光学計算値により求めてもよく、実験的に求めても良い。

【0126】[ウエハのプロセス変形に対する補正方法]次に、ウエハ20が変形した場合の結像特性の補正方法について説明する。ウエハ20は、露光後の現像やエッチング等のプロセス処理で等方的、あるいは非等方的に変形する場合がある。この場合、結像特性をウエハ20に合わせて補正することが必要となる。ウエハ20の変形量が分かれば、これまでの補正と同様にウエハ20の変形量に合わせて結像特性を補正すればよい。更に、ウエハ20内の位置により変形量が異なる場合には、それに応じて結像特性の補正の目標値を変更すればよい。

【0127】ここで、図1のウエハ20の変形量を求める方法について説明する。最も一般的な方法として、ウエハ20用のマーク検出センサによってウエハ20上のアライメントマーク(ウエハマーク)の目標位置からのずれ量を測定して、ウエハ20の変形量の分布を求める方法がある。マーク検出センサとして、He-Neレーザ光を投影光学系16を介してウエハ20上の被検マークにあてて回折光を検出するセンサや、投影光学系16とは別の光学系を設けてオフ・アクシス方式で画像処理

により検出するセンサが使用可能であり、露光装置とは全く別の計測機によりウエハ20上の被検マークの位置を検出して、計測データを露光装置に転送して補正する方法を使用してもよい。なお、プロセス処理によるウエハ20の変形量が予め判明している場合、ウエハ20の変形量を測定する必要はない。

【0128】また、プロセス処理によるウエハ20の熱変形量は、一般的に等方的な成分が大きいため、ウエハ20の等方的な倍率のみを算出して補正しても良い。この場合、算出すべきウエハ20の変形量の成分が倍率のみであるため、ウエハ20上の被検マークの数を減らすことができ、計測時間を短縮できるという利点がある。更に、ウエハ20の変形量を考慮してウエハステージ22の露光位置を決定することにより、重ね合わせ精度の向上を図ることができる。また、露光により生じるウエハ20の熱変形について補正する場合には、ウエハ20の反射率と照射量モニタ28の計測値との関係を予め実験的に求めておき、その関係から照射変動量を計算するとよい。

【0129】[第2の実施の形態]次に、本発明の第2の実施の形態について説明する。第1の実施の形態では、図6に示すように例えばレチクル14のブロックB1~B20ごとに結像特性の変化量を計算し、レチクル14の回転角を考慮して結像特性の補正を実行している。そのため、図5に示すように、レチクルステージ15上に回転機構49を設置する必要がある、レチクルステージ15が全体として重くなっていた。これに対してスループットを重視する場合には、レチクルステージ15を軽量化したいことがある。そこで、本例では、より簡便な機構でレチクル14の熱変形量に応じた結像特性を補正する。

【0130】先ず、レチクル14のパターン存在率を測定する。そのため、図1において、レチクルステージ15上の照明領域を含む領域にパターンの描かれていないテストレチクルを設置した状態で、照明条件(照明系開口絞りの種類、レチクルブラインド10の開口形状、及び投影光学系16の開口絞り17の開口形状等)を所定の状態に設定する。次に、ウエハステージ22を駆動して照射量モニタ28を投影光学系16の露光領域側に移動して、照射量モニタ28の有効受光領域がその露光領域をカバーするように位置決めし、インテグレートセンサ8の出力 I_0 と照射量モニタ28の出力 P_0 とを測定して記憶する。次に、実露光用のパターンの描かれたレチクル14をレチクルステージ15上に設置して、露光光源1の発光を開始して、インテグレートセンサ8の出力 I_1 と照射量モニタ28の出力 P_1 とを測定する。そして、次式に従ってパターン存在率 η を計算する。

【0131】

【数14】 $\eta = 1 - (P_1 / I_1) / (P_0 / I_0)$

本例でも、インテグレートセンサ8は露光光源1のパワ

一の変動をモニタするためにも使用される。なお、パターンの描かれていないテストレチクルでの測定時の照明条件と、パターンの描かれたレチクル14での測定時の照明条件とが異なる場合には、各々の照明条件に換算してパターン存在率を求める。例えば、図14(a1)に示すレチクルブラインド10に対して、図14(a2), (a3)の開口部10a, 10bで示すように、レチクルブラインド10の開口部の走査方向に対応する方向(これもY方向とする)の幅が異なる場合、パターンの描かれたレチクル14での測定時の開口部の面積と、パターンの描かれていないテストレチクルでの測定時の開口部の面積との比の値に照射量モニタ28の出力 P_0 の値を比例させて換算することになる。また、図4に示す照明系の開口絞り5a~5dや図1の投影光学系16の開口絞り17の開口が異なる複数の場合における、インテグレートセンサ8の出力と照射量モニタ28の出力との関係もそれぞれ予め測定して記憶しておけばよい。なお、本例ではパターンの描かれていないテストレチクルを使用しているが、レチクル14が無い状態で測定しても良い。

【0132】[レチクルのパターン面での照度測定方法]次に、レチクル14のパターン面(レチクル面)での照度測定について説明する。そのためには、図5のレチクルステージ15を駆動してレチクルステージ15上の照度センサ57を照明領域内のほぼ中央に移動して、照度センサ57の出力 W を測定する。なお、光透過窓55, 56のどちらかを介して照射量モニタ28で照度を測定しても良い。後者の場合、照射量モニタ28の出力と投影光学系16の透過率との関係を記憶しておき、照射量モニタ28の出力を投影光学系16の透過率で除算することでレチクル面での照度を算出することができる。更に、縮小投影系や拡大投影系においては投影倍率を考慮した上でレチクル面での照度を算出する。

【0133】また、予めインテグレートセンサ8の出力*

$$M_x(t) = M_x(t - \Delta t) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_x}\right) + K_x \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_x}\right)\right\}$$

【0137】

※ ※【数16】

$$M_y(t) = M_y(t - \Delta t) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_y}\right) + K_y \cdot \left\{1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_y}\right)\right\}$$

【0138】但し、 Δt はコンピュータの計算周期、 $M_x(t - \Delta t)$ は計算周期が1回前のX方向の倍率変化、 K_x は照射に対するX方向の倍率変化量を表す飽和値、 T_x は照射によるX方向の倍率変化量の時定数である。添え字がYのものはY方向の倍率に関するものである。飽和値と時定数とは予め実験により求めておくものとする。上記の式は、第1の実施例の照射による投影光学系16の倍率変化の計算式と同様に1階微分方式を解いて時系列表現したものである。なお、計算に使用する式は上記の式に限定されるわけではなく、例えば時定数成分を2つに拡張した伝達関数やむだ時間系の伝達関数★50

*とレチクル面での照度との関係を実験的に求めておいて、露光時はインテグレートセンサ8の出力からレチクル面の照度を計算しても良い。この場合、照度センサ57や照射量モニタ28を照明領域内に移動させる必要がないためスループットが向上するという利点がある。更に、レチクルステージ15上に発熱物である照度センサ57を設置する必要がないので、レチクルステージ15の熱的な安定性を向上させることができる。

【0134】[レチクルの反射率の測定方法]次に、レチクル14の反射率を測定する。このために、ウエハ20の反射率測定と同様の手法を適用する。まず、レチクルステージ15上に反射率が既知である2つの基準反射板(不図示)を設けておき、これらの基準反射板を順次照明領域内に移動して、それぞれ図1の反射率センサ9の出力を測定する。これにより、レチクル面での反射率と反射率センサ9の出力との関係を線形関係(1次関数)として求めることができる。その後、実際の露光に使用するレチクル14をレチクルステージ15上に設置して、パターンの描かれている部分を照明領域内に移動して、反射率センサ9の出力を測定し、この測定結果と先に求めた反射率と反射率センサ9の出力との線形関係とから、パターンの描かれたレチクル14の反射率を算出できる。通常、レチクル14の最外周部はクロムパターンで覆われているので、その部分を使用して反射率測定を行うと良い。なお、レチクル14の反射率が予め判明している場合には、レチクル14の反射率を記憶しておくだけで良い。この場合、反射率を測定する必要がなくスループットを向上させるという利点がある。

【0135】[レチクルの熱変形量の計算方法]次に、これまで測定したパラメータを用いて、次式よりレチクル14の熱変形量を計算する。

【0136】

【数15】

40★などを導入しても良い。

【0139】[X方向、Y方向の倍率変化の補正方法]次に、第1の実施の形態における投影光学系16の結像特性の補正と同様に、図2の各レンズ群36~40を駆動し、レチクル14の熱変形によるX方向の倍率変化量を補正する。他の結像特性の変化量が小さい場合には、駆動するレンズ群は1つでも良い。また、レンズ群36~40の駆動による他の結像特性の変化量が無視できない場合には、駆動するレンズ群を増やせば良い。

【0140】Y方向の倍率変化量は、レチクル14とウエハ20との相対走査速度を変更することにより補正す

る。レチクル14は露光するごとに熱変形するため、1ショットごとに相対走査速度をレチクル14の熱変形量に応じて変更する。なお、熱変形によるレチクル14の変化が緩やかであれば、ウエハ20を1枚露光すると、ウエハ20を数枚露光すると、ロット処理の先頭、又はレチクル14の熱変形量が所定の閾値を超えるごとく等のように、相対走査速度の変更を行う間隔を変更しても良い。

【0141】X方向の倍率変化量とY方向の倍率変化量とが同量であれば、X方向、Y方向の各補正により投影像は所定の状態になり、レチクル14とウエハ20との相対走査速度も変化しない。しかし、X方向の倍率変化量とY方向の倍率変化量とに差が生じている場合には、投影像のコントラストが低下する。この補正方法について、図14に沿って説明する。

【0142】図14は、レチクルブラインド10の幅と投影像のコントラストとの関係を示し、レチクルブラインド10の幅が図14(a1)～(a3)に示す場合の、ウエハ20上での投影像の照度分布がそれぞれ図14(b1)～(b3)に示されている。X方向の倍率変化量とY方向の倍率変化量とに差が生じている状態で、レチクルブラインド10の開口部の幅を図14(a1)に示すように所定幅に設定して走査露光した場合、その差に応じて投影像の位置に位置ずれを生じる。このとき、レチクルブラインド10の開口部のY方向の幅の積算値に対応してウエハ20に塗布されたレジストは感光するため、Y方向に投影像がずれた分だけコントラストは低下する。しかし、図14(a2)のように、レチクルブラインド10の開口部10aの走査方向の幅を狭くして走査露光すると、投影像のY方向の位置ずれ量は開口部10aのY方向の幅に比例して小さくなる。また、図14(a3)のように、レチクルブラインド10の開口部10bの走査方向の幅を更に狭くすると、一層投影像のコントラストを向上させることができる。レチクルブラインド10の開口部のY方向の幅と投影像のコントラストとの関係は、予め例えばシミュレーションにより求めておけば良い。このとき、複数のパターンについて別々にシミュレーションして記憶しておくことで、パターンの種類の違いに応じてレチクルブラインド10の開口部の最適な幅を設定することができる。例えば、線幅が太いパターンの場合に比べて、線幅が細いパターンの場合には、レチクルブラインド10の開口部のY方向の幅を狭くすると良い。

【0143】但し、レチクル14とウエハ20との各々の走査速度を変更せずに、レチクルブラインド10の開口部のY方向の幅を狭くするとウエハ20上での露光量が不足する。この場合、レチクルブラインド10の開口部のY方向の幅を狭くした量に応じて、レチクル14とウエハ20との走査速度を速度比が一定(投影倍率)のままで遅くすることにより露光量を一定に保つことがで

きる。なお、露光光源1のパワーを増加させたり、本例のように露光光源1がKrFエキシマレーザやArFエキシマレーザ等のパルスレーザ光源である場合には、露光光源1の発振周波数を増やすことでも同様の効果を得ることができる。この場合、走査速度を遅くする必要がないので、スループットの悪化を防ぐことができる。

【0144】上記のように、本例ではレチクル14の熱変形量をX方向とY方向とで各々1種類計算しているが、必要な精度に対して熱変形量が多い場合には、X方向、Y方向の各々複数の像高で倍率を計算すると良い。この場合、結像特性を補正するために駆動させるレンズ群が最低でも2つ必要になる。また、図2のレンズ群36～40の駆動などにより変化する結像特性の種類に応じて、駆動するレンズ群を増やしても良い。

【0145】なお、本例ではレチクル14のX方向の倍率変化量とY方向の倍率変化量とに応じた露光量制御について説明したが、同様の手法を投影光学系16の結像特性の補正に適用することができる。この場合、投影光学系16の倍率変化量を、レチクル14の熱変形量の計算と同様にX方向とY方向とで別々に計算する。そして、レチクル14の場合と同様にX方向の倍率変化量とY方向の倍率変化量との差の補正後の残留分に応じて、レチクルブラインド10の開口部のY方向の幅、及び走査速度を変更することで露光量を一定に保つことができる。投影光学系16の照射によるX方向の倍率変化量とY方向の倍率変化量との関係は、実験により求めておけば良い。

【0146】[計算の不連続性] また、本例中の補正では、コンピュータによりレチクル14の熱変形量、及び投影光学系16の照射による結像特性の変化量を計算しているため、コンピュータの計算間隔による離散化誤差が生じる場合がある。この場合、必要精度を得るために必要な計算間隔に対応できる高速な計算機を採用して連続的に制御できるようにすることが最も一般的であり、コンピュータを選択する際には必要精度と計算量とを考慮する必要がある。実際にレチクル14を回転したり、レンズ群36～40を駆動したりする際に、結像特性の変化量と必要精度とから考えて制御目標値をそれほど連続的に変更する必要がない場合には、不連続に制御目標値を変更する方法を採用しても良い。この場合、補正誤差は多少粗くなるが、これまでと同様の効果は得られる。即ち、補正量が小さい場合には、計算間隔、又は制御目標値の変更間隔を粗くしても良いと言える。また、本例で計算している他の種々の結像特性の変化量の補正に関しても同様のことが言え、必要精度に対し補正量が小さい場合には、計算間隔、又は制御目標値の変更間隔を粗くしてコンピュータの能力に余裕を持たせてもよい。

【0147】つまり、レチクル14の熱変形量が多い(パターン存在率が大きく熱吸収量が多い)場合には、

投影光学系16に向かう露光光の光量が減少して露光光の照射による投影光学系16の結像特性の変動量(照射変動量)は小さくなるため、レチクル14の熱変形量と投影光学系16の照射変動量とはどちらかが大きいと他方は小さくなる関係にある。従って、レチクル14のパターン存在率に応じて、レチクル14の熱変形量の計算間隔、又は制御目標値の変更間隔と、投影光学系16の照射変動量の計算間隔、又は制御目標値の変更間隔とを変更しても良い。例えば、レチクル14がコンタクトホールパターン用である場合には、細かいコンタクトホールがレチクル14内に点在しているのみで、レチクル14のパターン領域は殆どクロム膜に覆われていてパターン存在率は100%に近い。

【0148】このような場合、例えばレチクル14の熱変形量の計算間隔と投影光学系16の照射変動量の計算間隔とをそれぞれ1msecにした場合には処理不能なコンピュータであっても、レチクル14の熱変形量の計算間隔を1msecのまま投影光学系16の照射変動量の計算間隔を10msecにすることで計算誤差の小さい補正ができる。もちろん、制御目標値の変更間隔を粗くすることでも同様の効果が得られる。なお、この計算間隔は上述の数値に限定されるものではないことは言うまでもない。また、計算誤差についてのみ記述したが、補正間隔についても同様のことが言える。この他に、計算誤差と異なり、補正間隔を選択する上では共振を避ける等の制御上の指針、例えば、制御安定性や応答速度等から補正間隔を決定しても良い。

【0149】[より具体的な補正方法]次に、より実際に露光されるレチクルに近いレチクルの熱変形量の補正の例を示す。ウエハ20の歪みの補正や投影光学系16のディストーションの補正においても同じ手法を適用することができる。先ず、上記のレチクル14の熱変形量を以下の式を用いて最小2乗法により成分分解する。

【0150】

$$\begin{aligned} \text{【数17】 } Dx &= k1 + k3 \cdot x + k5 \cdot y + k7 \cdot x^2 + k9 \cdot x \cdot y + k11 \cdot y^2 + k13 \cdot x^3 + k15 \cdot x^2 \cdot y + k17 \cdot x \cdot y^2 + k19 \cdot y^3, \\ Dy &= k2 + k4 \cdot y + k6 \cdot x + k8 \cdot y^2 + k10 \cdot y \cdot x + k12 \cdot x^2 + k14 \cdot y^3 + k16 \cdot x \cdot y^2 + k18 \cdot x^2 \cdot y + k20 \cdot x^3 \end{aligned}$$

但し、これらの式において、 Dx 、 Dy は各計算像高でのX方向とY方向とのそれぞれのディストーションの変化量、 $k1 \sim k20$ は各成分ごとの変形量を表す係数、 x 及び y は各計算像高の座標を表している。なお、本例では、3次成分までのモデルとしたが、より高精度に補正する必要がある場合には、必要に応じて次数を高次に拡張すれば良い。

【0151】図15(a)～(f)、図16(a)～(f)、図17(a)～(f)、及び図18(a)、(b)は、それぞれレチクルの変形量の成分ごとの係数

$k1 \sim k20$ に対応するレチクルの変形量の分布の一例を示し、図15～図18において、レチクル14の熱変形前の状態が白丸の格子点69で表され、変形後の状態が黒丸の格子点68で表されている。以下、図15～図18を参照して、レチクル14の熱変形量の例及びその補正方法について係数 $k1 \sim k20$ ごとに説明する。

【0152】図15(a)は、係数 $k1$ に対応したレチクルの変形を示し、XシフトがY座標によらず一定量発生している場合でもある。これは、図1において走査露光の際にレチクル14を一定量X方向にずらすことにより補正することができる。なお、レチクル14とウエハ20との相対的なX方向の位置がずれれば良いので、ウエハ20側を投影倍率を考慮して一定量ずらして走査露光しても良い。また、レチクル14とウエハ20との両方をずらしても走査露光しても良い。

【0153】図15(b)は、係数 $k2$ に対応した変形を示し、YシフトがY座標によらず一定量発生している場合でもある。これは、走査露光の際にレチクル14を一定量Y方向にずらすことにより補正することができる。なお、図15(a)の場合と同様に、レチクル14とウエハ20との相対的なY方向の位置がずれれば良いので、ウエハ20側で補正しても良く、レチクル14とウエハ20との両方で補正しても良い。

【0154】図15(c)は、係数 $k3$ に対応した変形($=k3 \cdot x$)を示し、X方向に像高に比例した倍率変化が生じた場合でもあり、図7のX倍率1とX倍率2とが各計算像高に比例して発生していることになる。これは、図2のレンズ群36～40の光軸方向への駆動を組み合わせて倍率変化を調整してから、走査露光することにより補正する。なお、レンズ群36～40の光軸方向への駆動によりY方向にも倍率変化が生じ、投影像のコントラストが低下する。これが問題になる場合には、走査露光前にレチクルズラインD1.0の開口部のY方向の幅、又は露光量を変更して投影像のコントラストを調整すればよい。

【0155】図15(d)は、係数 $k4$ に対応した変形($=k4 \cdot y$)を示し、Y方向に像高に比例した倍率変化が生じた場合でもあり、YシフトがY座標に比例して発生していることになる。従って、レチクル14の走査位置に応じて、Y方向の走査速度を所定の値から一定量ずらすことにより補正できる。例えば、Y方向の位置に応じてYシフト量が大きくなる場合、即ち、Y方向に倍率が大きくなっている場合には、レチクル14の走査速度を高速にする。なお、レチクル14とウエハ20との相対速度が変更されれば良いので、ウエハ20側を低速にしても良い。また、レチクル14とウエハ20との両方の速度を変更しても良い。

【0156】図15(e)は、係数 $k5$ に対応した変形($=k5 \cdot y$)を示し、X方向を底辺とする平行四辺形状に変形した場合でもあり、Xシフトが走査方向の座標

(Y座標)に応じて変化していることになる。従って、レチクル14とウエハ20との走査軸を相対的に傾けることで補正できる。レチクル14側で補正する際に、レチクルステージ15のX軸のレーザ干渉計が常にレチクル14の照明領域を参照しているように構成されている場合には、Y方向の走査位置に応じて、X方向のオフセットを直線的に変更すればよい。なお、ウエハ20側あるいはレチクル14とウエハ20との両方で補正しても良い。

【0157】図15(f)は、係数 k_6 に対応した変形($=k_6 \cdot x$)を示し、Y方向を底辺とする平行四辺形状に変形した場合でもあり、レチクル14を所定量回転させたままレチクル14とウエハ20との走査軸を相対的に傾けることで補正できる。また、レチクルステージ15のX軸のレーザ干渉計が常にレチクル14の照明領域を参照しているように構成されている場合には、レチクル14の回転によりレチクルステージ15の移動鏡53(図5参照)も一緒に回転するため、レーザ干渉計の計測値が所定値になるようにサーボ制御を行って走査することにより、自動的にレチクル14は徐々にX方向にずれていき結果的に走査軸を傾けていることになる。レチクル14の回転機構49とレチクルステージ15の移動鏡53とが連動しない構成の場合には、レチクル14を所定量回転させて、走査に応じてX方向にずらしていくことで同様の効果を得られる。

【0158】図16(a)は、係数 k_7 に対応した変形($=k_7 \cdot x^2$)を示し、X方向の偏芯倍率変化でもあり、図7のX倍率傾斜1、X倍率傾斜2が一定量発生していることになる。従って、レンズ群36~40を組み合わせて光軸に対して傾斜してから走査露光することで補正できる。なお、レンズ群36~40を傾斜して倍率傾斜を発生すると倍率を大きくした側ではY方向の倍率が大きくなり、倍率を小さくした側ではY方向の倍率が小さくなるため、X座標によっては投影像の位置ずれが反対方向になり投影像のコントラストが低下することになる。この場合、レチクルブラインド10の開口部のY方向の幅の変更と露光量の変更とを組み合わせることで補正すればよい。

【0159】図16(b)は、係数 k_8 に対応した変形($=k_8 \cdot y^2$)を示し、Y方向の偏芯倍率変化でもあり、Y座標に応じてYシフトが変化していることになる。従って、レチクル14とウエハ20との相対速度を走査位置に応じて変更することにより補正できる。具体的に、走査露光しながらY座標に応じてYシフトを補正するようにレチクル14にY方向にずらしていけばよい。なお、本例では、走査速度を走査位置に応じて直線的に変更することで補正するが、もちろん、使用するモデルに応じて任意に変更しても良い。なお、ウエハ20とレチクル14との両方の速度を変更して補正しても良い。

【0160】図16(c)は、係数 k_9 に対応した変形

($=k_9 \cdot x \cdot y$)を示し、X方向を底辺とする台形状に変形した場合でもあり、Y座標に応じてX倍率1、X倍率2が変化していることになる。従って、その補正には、走査位置に応じて投影倍率を変更すれば良い。具体的に、走査位置に応じてレンズ群36~40を光軸方向に駆動することで補正できる。

【0161】図16(d)は、係数 k_{10} に対応した変形($=k_{10} \cdot y \cdot x$)を示し、Y方向を底辺とする台形状に変形した場合でもあり、Y座標に応じてレチクル14が回転していることになる。従って、走査位置に応じてレチクル14とウエハ20との相対平行度を変更することで補正できる。図16(e)は、係数 k_{11} に対応した変形($=k_{11} \cdot y^2$)を示し、Y座標に応じてXシフトが変化していることになる。従って、走査位置に応じてレチクル14とウエハ20との相対位置をX方向にずらすことで補正できる。

【0162】図16(f)は、係数 k_{12} に対応した変形($=k_{12} \cdot x^2$)を示し、これは第1の実施の形態での成分分解で表すことはできない。これを補正するためには、一例として他の成分を組み合わせるべく誤差が小さくなるように補正すればよい。例えば、係数 k_2 の成分と係数 k_8 の成分との補正によって誤差を小さくすることが可能である。この場合、(数17)から係数 k_{12} の項を削除して最小2乗法により計算することで、自動的に係数 k_{12} の成分が他の成分に振り分けられる。また、その図16(f)の変形は、レチクルの中心からのX座標の偏差量が大きいほど特定(+方向、又は-方向)のY方向に変形している場合でもある。そこで別の補正方法として、投影光学系16を構成する一部のレンズをX軸に(非走査方向に)平行な軸の回り、即ちY方向(走査方向)に傾斜させたまま走査露光すればよい。

【0163】図17(a)は、係数 k_{13} に対応した変形($=k_{13} \cdot x^3$)を示し、X方向の倍率変化でもあり、X倍率1とX倍率2とが各計算像高に比例しない点で係数 k_3 の場合と異なる。そのディストーションは、各レンズ群36~40を光軸方向に駆動してX倍率1とX倍率2とを各々補正してから走査露光することで補正できる。なお、レンズ群36~40の光軸方向への駆動によりY方向にも倍率変化が生じて投影像のコントラストが低下する。これが問題になる場合には、走査露光前にレチクルブラインド10の開口部のY方向の幅や、露光量を変更してから露光を開始すると良い。

【0164】図17(b)は、係数 k_{14} に対応した変形($=k_{14} \cdot y^3$)を示し、Y方向の倍率変化でもあり、YシフトがY座標に比例しない点で係数 k_4 の場合と異なる。このディストーションは、走査位置に応じてレチクル14とウエハ20との走査速度を変更することで補正できる。図17(c)は、係数 k_{15} に対応した変形($=k_{15} \cdot x^2 \cdot y$)を示し、X倍率傾斜1、X倍

43

率傾斜2も変化している点で係数k5の場合と異なる。このディストーションは、走査位置に応じてX倍率傾斜1、X倍率傾斜2を補正するようにレンズ群36~40の傾斜角を変更することによりで補正できる。

【0165】図17(d)は、係数k16に対応した変形($=k16 \cdot y^2 \cdot x$)を示し、回転量が一定にならない点で係数k6の場合と異なる。これは、走査位置に応じてレチクル14とウエハ20との相対的な平行度を変更することで補正できる。図17(e)は、係数k17に対応した変形($=k17 \cdot x \cdot y^2$)を示し、X方向の糸巻き型ディストーションでもあり、Y座標に応じてX倍率1、X倍率2が変化していることになる。従って、走査位置に応じてX倍率1、X倍率2を補正するように光軸方向にレンズ群36~40を駆動することで補正できる。なお、レンズ群36~40の光軸方向への駆動によりY方向にも倍率変化が生じるため投影像のコントラストが低下する。これが問題になる場合には、走査露光前にレチクルブラインド10の開口部のY方向の幅や、露光量を変更してから露光を開始すれば良い。

【0166】図17(f)は、係数k18に対応した変形($=k18 \cdot y \cdot x^2$)を示し、Y方向の糸巻き型ディストーションでもあり、これは第1の実施の形態での成分分解で表すことはできない。これを補正するためには、一例として他の成分を組み合わせてなるべく誤差が小さくなるように補正すればよい。例えば、係数k4の成分と係数k14の成分との補正によって誤差を小さくすることが可能である。この場合、(数17)から係数k18の項を削除して最小2乗法により計算することで、係数k18の成分を他の成分に振り分けることができる。また、図17(f)の変形は、レチクルの中心からのX座標の偏差量が大きくなるほどY方向(走査方向)の倍率が大きくなっている変形でもある。そこで、この変形を補正するための別の方法として、図1.6

(f)の補正方法を応用して、投影光学系16を構成する一部のレンズのY方向への傾斜角を、レチクルの走査方向の位置に応じて連続的に変化させながら走査露光を行う方法もある。なお、そのレンズの傾斜角を連続的に変化させると、ウエハ上の投影像の位置も変化するため、レチクルの走査方向の位置に応じて、レチクルとウエハとの相対位置の補正を行うことが望ましい。

【0167】図18(a)は、係数k19に対応した変形($=k19 \cdot y^3$)を示し、走査位置に応じてXシフトが比較的ランダムに発生している場合でもある。これは走査位置に応じてレチクル14とウエハ20とのX方向の相対位置を変更することで補正できる。図18(b)は、係数k20に対応した変形($=k20 \cdot x^3$)を示し、係数k19を90°回転したような形であり、第1の実施の形態での成分分解で表すことはできない。これを補正するためには、他の成分を組み合わせてなるべく誤差が小さくなるように補正すればよい。例えば、係数

44

k5の成分と係数k16の成分との補正によって誤差を小さくすることが可能である。この場合、(数17)から係数k20の項を削除して最小2乗法により計算することで、自動的に係数k20の成分が他の成分に振り分けられる。

【0168】なお、上記の実施の形態において、レチクル14は露光光の吸収によって熱変形するが、そのパターン領域内でのパターンの面積や密度(クロム、又は位相シフトなどの占有率)などによって、そのパターン領域内での変形量が均一とならない、即ち非等方的に変形することが多い。そこで、例えば走査方向に関しては、一例としてパターン領域内での変形量又は変形率をその位置に対応付けて検出し、この検出した変形量又は変形率に基づいて、走査露光中にレチクルとウエハとの速度比を連続的又は段階的に変化させるようにする。ここで、照明領域内における走査方向の位置に応じたレチクルの変形量又は変形率を平均化し、この平均値に基づいて前述の速度比を決定するようにしてもよい。このとき、レチクルが所定距離だけ移動するたびに照明領域内での変形量又は変形率の平均値を決定するようにしてもよい。なお、所定距離は一例として、露光光がエキシマレーザ光のようなパルス光である場合には、そのパルス発光間にレチクルが移動する距離程度以上であって、照明領域の幅程度以下である。また、前述の平均値を求めるとき、例えばパターンの線幅に応じた重みを変形量又は変形率に与えるようにしてもよい。具体的には、線幅が細い程、その位置における変形量又は変形率に与える重みを大きくする。

【0169】また、非走査方向に関しては、一例としてその不均一な変形率又は変形量の平均値を求めて、投影光学系の少なくとも1つの光学素子を移動してその投影倍率及び/又はディストーションを調整する。ここで、走査方法の位置毎に非走査方向に関する変形率又は変形量(その平均値)が異なるときは、走査露光中に投影倍率及び/又はディストーションを連続的又は段階的に変化させるようにする。また、前述の平均値を求めるとき、例えば最もパターンの線幅が細くなる位置での変形量又は変形率に最も大きな重みを与えるように、非走査方向の位置に対応した変形量又は変形率にそれぞれ重み付けを行うようにしてもよい。

【0170】なお、上記説明は走査露光中に速度比や投影光学系の結像特性を変化させるものであり、従来通り走査露光に先立ち、予めレチクルの変形、ウエハ(ショット領域)の変形、及びパターン像の倍率(及び像歪み)の変化の少なくとも1つに基づいて、レチクルとウエハとの速度比、及び投影光学系の投影倍率及び/又はディストーションを調整しておくことが望ましい。また、ウエハ上のショット領域が不均一に変形しているときは、走査露光中にその変形量又は変形率に応じてレチクルとウエハとの速度比、及び/又は投影光学系の投影

倍率とディストーションの少なくとも一方を調整するようにしてもよい。このとき、前述したレチクルの不均一な変形をも考慮して速度比や投影倍率、ディストーションを調整することが望ましい。

【0171】次に、上記の実施の形態では、投影光学系16の所定の結像特性を補正するために、図2に示すように投影光学系16のレチクル14側、及びウエハ20側にZ方向（光軸方向）の位置や傾斜角を制御できる平行平板35、41が設けられている。なお、その平行平板には、表面に微少な凹凸が形成されている平板も含まれているため、以下では結像特性補正用に使用される平行平板状の光学部材、即ち表面に微少な凹凸分布（位相分布）を有するもの、部分的に異なる屈折率分布を有するもの、又は局所的に或る程度の屈折力（パワー）を持つもの等を含めた平行平板状の光学部材を単に「平板」と呼ぶ。

【0172】この平板を用いると以下の（a）～（j）に示すような結像特性のランダムな変動（不規則な変動）を補正することができる。その結像特性のランダムな変動とは、投影像中に部分的に（局所的に）生じる結像特性の変動を意味している。実際には、複数種類の平板を交換自在に配置しておき、レチクルの熱変形の状態等に応じて生じている結像特性の変動量を相殺するのに好適な平板を適宜、結像光束の光路上に配置するようにしてもよい。これによって、次第に変化する結像特性の変動も補正することができる。

【0173】（a）部分的な焦点位置のずれ
投影光学系16の外側、即ち例えば投影光学系16とレチクル、又はウエハとの間に、部分的な屈折力分布を持つ平板を配置することで補正できる。

（b）部分的な結像点の横シフト（実質的に部分的なディストーションと同じ）

投影光学系16の外側に、部分的に傾斜角が変化している1枚、又は複数枚の平板を配置することで補正できる。複数枚の平板を使用する場合には、投影光学系16のテレセントリック性を悪化させないことが可能である。

【0174】（c）部分的な球面収差

投影光学系16の内部のレチクルのパターン面に対する光学的なフーリエ変換面（即ち、瞳面）の近傍に、部分的に照明光の波面の遅れ（又は進み）を打ち消すような凹凸分布（即ち、位相差を与える形状）を有する平板を配置することによって補正できる。また、その瞳面の近傍のレンズの面にそのような凹凸分布を与える加工を行っても補正できる。

（d）部分的なコマ収差

投影光学系16の内部でその瞳面から離れた位置に、部分的に照明光の波面の遅れ（又は進み）を打ち消すような凹凸分布（即ち、位相差を与える形状）を有する平板を配置することによって補正できる。また、その瞳面の

近傍のレンズの面にそのような凹凸分布を与える加工を行っても補正できる。

【0175】（e）サジタル像面における像面湾曲
投影光学系16の外側に、部分的にサジタル方向への屈折力分布を持つ平板を配置することで補正できる。

（f）メリジオナル（タンジェンシャル）像面における像面湾曲

投影光学系16の外側に、部分的にメリジオナル（タンジェンシャル）方向への屈折力分布を持つ平板を配置することで補正できる。

（g）部分的なディストーション

投影光学系16の外側に、部分的に傾斜角が変化している1枚、又は複数枚の平板を配置することで補正できる。複数枚の平板を使用する場合には、投影光学系16のテレセントリック性を悪化させないことが可能である。

【0176】（h）部分的な縦の色収差

投影光学系16の外側に、部分的に分散（アッペ数）の異なる光学材料（硝材）を用いるか、又は部分的に異なる屈折率分布を持つ光学材料を用いて製造された平板を配置することで補正できる。

（i）部分的な横の色収差

投影光学系16の内部に、部分的に分散（アッペ数）の異なる光学材料を用いるか、又は部分的に異なる屈折率分布を持つ光学材料を用いて製造された平板を配置することで補正できる。

（j）部分的なテレセントリック性の崩れ

投影光学系16の外側に、部分的に傾斜角が変化している1枚、又は複数枚の平板を配置することで補正できる。複数枚の平板を使用する場合には、投影像のディストーション（結像点の横シフト）に影響を与えないことが可能である。

【0177】なお、上記の実施の形態では、レチクル14の熱変形について説明したが、ウエハ20が歪んでいる場合や、重ね合わせ露光するときに前の露光装置のディストーション特性が歪んでいる場合や、投影光学系16に非等方的なディストーションが発生している場合に適用しても良い。この場合、レチクル14の熱変形量と、投影光学系16の照射変動量と、ウエハ20の歪みと、前の露光装置のディストーション特性とから総合的に誤差が小さくなるように補正しても良い。

【0178】また、上記の実施の形態では露光装置としてステップ・アンド・スキャン方式の投影露光装置が使用されているが、レチクルの熱変形量に応じた結像特性の補正等は、露光装置としてステッパーのような一括露光型の投影露光装置を使用する場合にも適用できる。また、本発明は露光光としてX線を使用する露光装置、又は電子線露光装置等にも適用することができる。このように、本発明は上述の実施の形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の構成を取り得る。

【0179】

【発明の効果】本発明の第1の投影露光方法によれば、投影光学系の少なくとも1つの光学素子の光軸方向の位置、少なくとも1つの光学素子の光軸方向の傾斜角、マスクと基板との相対走査速度、及びマスクと基板との走査方向の平行度の内の少なくとも1つを調整することで、高精度に結像特性を補正できる利点がある。これによってマスクのパターン像を基板上に高精度に転写できる。

【0180】また、本発明の第2、又は第3の投影露光方法によれば、マスクの熱変形による結像特性の変化を走査方向の成分と非走査方向の成分とでそれぞれ独立的に補正するため、マスクの熱変形による結像特性の変化を高精度に補正できる。また、マスクのパターン存在率に基づいてマスクの熱吸収量を求めることで、マスクの熱変形量を正確に求めることができる。更に、マスクのパターン領域外で生じる熱移動を考慮してマスクの熱変形量を求めることにより、マスクの熱変形量、ひいてはこれによる結像特性の変化量を高精度に求めることができ、それに基づいて高精度に結像特性を補正することができる。

【0181】また、本発明の第4の投影露光方法によれば、基板上に結像されるマスクのパターンの像の走査方向と非走査方向との倍率変化の差に応じて、ブラインド機構を駆動して照明領域の幅を調整することにより、結像特性としての投影像のコントラストを高精度に補正することができる。また、本発明の第5の投影露光方法によれば、マスクステージ上の光透過窓を介してウエハステージ上の照射量センサにより露光光源の照射量を測定して投影光学系の透過率を求めるため、マスクに影響されることなく高精度に照明光吸収による投影光学系の結像特性の変化を求めることができ、結果として高精度に結像特性を補正できる。

【0182】また、2つの光透過窓を、マスクを挟み、かつマスクの移動方向に離して設置する場合、マスクを走査方向の正逆方向どちらに走査した場合でも、走査を継続したまま光透過窓を照明領域内に移動させることができるため、スループットが低下しない。また、本発明の第6の投影露光方法によれば、投影光学系の複数の光学素子をそれぞれ独立的に駆動することにより投影光学系の結像特性を補正ことができ、また、投影光学系の基板側に備えられた第1平行平面板を駆動することにより所定の結像特性を高精度に補正することができる。

【0183】また、投影光学系のマスク側に備えられた第2平行平面板の表面に所定の凹凸加工が施されているときには、投影光学系の光学素子の製造誤差等により発生するディストーションを高精度に補正することができる。また、2次光源の形状と大きさとの少なくとも一方を変更すると共に第1平行平面板を駆動することで、2次光源の形状と大きさとの応じた投影光学系の偏心コマ

収差の補正を行うことができる。

【0184】また、露光光源としてArFエキシマレーザ光源を使用し、かつ投影光学系内部を窒素ガス、又は不活性ガスで置換する場合には、酸素が反応してオゾンが発生するのを防ぐことができ、また、露光光に対する透過率が向上する。また、投影光学系内部の気圧を測定する場合には、その測定結果に基づいてより高精度に投影光学系の結像特性の補正を行うことができる。

【0185】次に、本発明の投影露光装置によれば、本発明の投影露光方法を実施できると共に、第1平行平面板を移動することにより投影光学系の偏心コマ収差を調整することができ、また、第2平行平面板をマスクに対して相対移動することなく複数の光学素子の少なくとも1つを移動することにより、偏心コマ収差以外の投影光学系の収差、投影倍率、及び焦点位置の少なくとも1つを調整することができる。

【0186】また、投影光学系の少なくとも3つ～5つの光学素子を移動する場合には、それぞれ投影光学系の3つ～5つの結像特性を補正できる。また、マスクと複数の光学素子とによって形成される複数の空間の内の少なくとも1つで屈折率を変化させる調整装置により、簡単な制御で所定の結像特性を補正できる。

【0187】また、照明光学系は、マスクのパターンに応じて2次光源の形状と大きさとの少なくとも一方を変更することができ、その変更ごとに複数の光学素子と第1平行平面板との少なくとも1つを駆動するときには、照明条件に応じた結像特性の補正ができる。また、投影光学系内部の気圧を測定し、その気圧の変化に連動して複数の光学素子と第1平行平面板との少なくとも一つを移動するときには、より高精度に結像特性の補正を行うことができる。

【0188】また、第1平行平面板、又は第2平行平面板によりそれぞれ投影光学系の偏心コマ収差、又は非対称な収差を調整することができる。また、マスクのパターンの像を基板上に走査露光するためにマスクと基板とを同期移動するステージ・システムを備えることにより、本発明をステップ・アンド・スキャン方式のような走査型露光装置に適用できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態の一例で使用される投影露光装置を示す概略構成図である。

【図2】 図1の投影光学系16の内部構成を示す一部を切り欠いた構成図である。

【図3】 図2の投影光学系16のレンズ群の一部を示す平面図である。

【図4】 図1の照明系の開口絞り板5に設けられた複数の開口絞りを示す図である。

【図5】 図1のレチクルステージ15の駆動機構等を示す平面図である。

【図6】 レチクル14の熱変形量の計算方法の説明に

供する図である。

【図7】 レチクルの熱変形量を分解して得られる各成分と、対応する結像特性の補正量との関係を示す図である。

【図8】 熱変形量の各成分を走査方向の座標に応じて関数化する方法の説明に供する図である。

【図9】 露光領域外の熱移動を考慮に入れた場合のレチクルの熱変形量の計算点の分布の一例を示す図である。

【図10】 レチクルの一部のみを露光領域とする場合のレチクルの熱変形量の計算方法の説明に供する図である。

【図11】 レチクルの一部のみを露光領域とする場合に、露光領域外の熱移動を考慮に入れたレチクルの熱変形量の計算方法についての説明に供する図である。

【図12】 レチクルの一部のみを露光領域とする場合に、露光領域外の熱移動を考慮に入れたレチクルの熱変形量の計算方法の他の例の説明に供する図である。

【図13】 ウエハの反射率と反射率センサの出力との関係を示す図である。

【図14】 図1のレチクルブラインド10の開口部の幅と投影像のシフト量との関係を示す図である。

【図15】 係数 $k_1 \sim k_6$ に対応するレチクルの熱変形の例を示す図である。

【図16】 係数 $k_7 \sim k_{12}$ に対応するレチクルの熱

変形の例を示す図である。

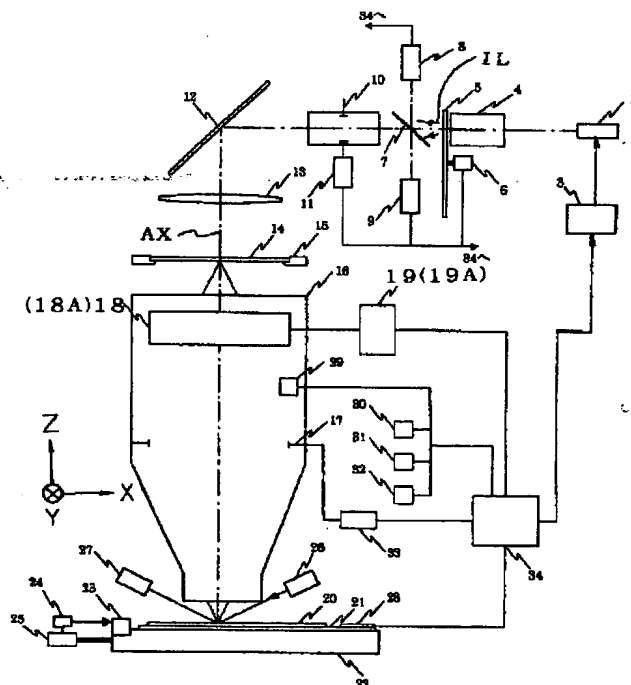
【図17】 係数 $k_{13} \sim k_{18}$ に対応するレチクルの熱変形の例を示す図である。

【図18】 係数 k_{19}, k_{20} に対応するレチクルの熱変形の例を示す図である。

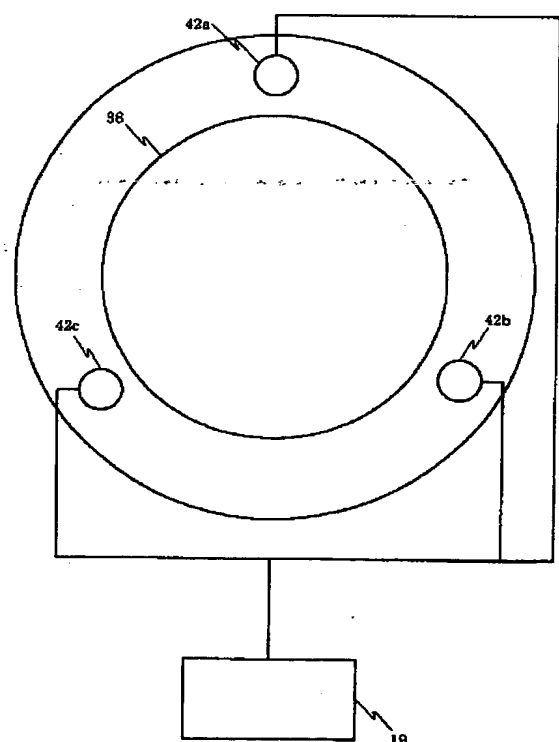
【符号の説明】

1…露光光源、3…電源、4…フライアイレンズ、5…開口絞り板、5a, 5b, 5c, 5d…開口絞り、7…ビームスプリッタ、8…インテグレートセンサ、9…反射率センサ、10…レチクルブラインド、13…コンデンサレンズ、14…レチクル、15…レチクルステージ、16…投影光学系、17…開口絞り、18…結像特性補正部、19…結像特性制御部、20…ウエハ、21…試料台、22…ウエハステージ、23…移動鏡、24…レーザ干渉計、25…ウエハステージ駆動系、26…オートフォーカスセンサの送光系、27…オートフォーカスセンサの受光系、28…照射量モニタ、29…投影光学系内部の気圧センサ、30…温度センサ、31…気圧センサ、32…湿度センサ、34…主制御系、35…平行平板、36～40…レンズ群、41…平行平板、42～47…駆動素子、48…微動ステージ、49…回転機構、50…粗動ステージ、51…駆動モータ、53, 54…移動鏡、55, 56…光透過窓、57…照度センサ、58…基準反射板

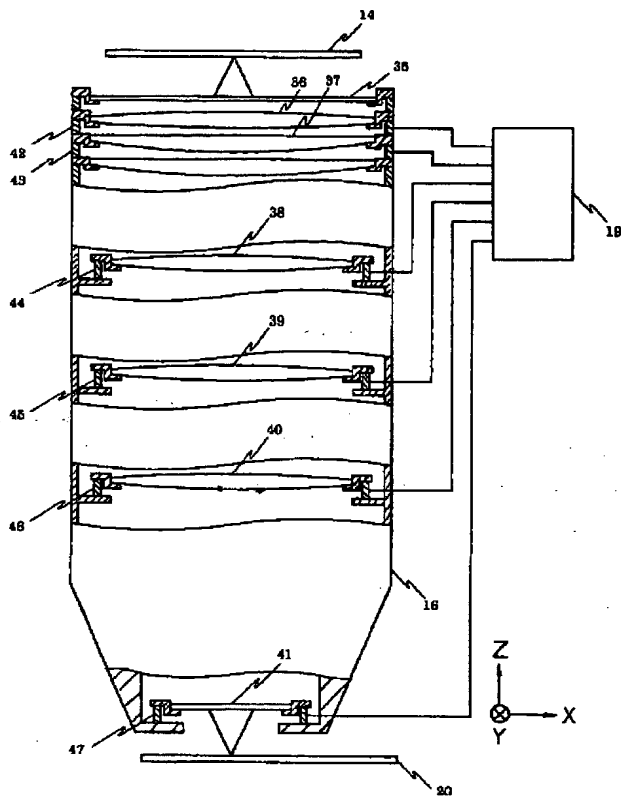
【図1】



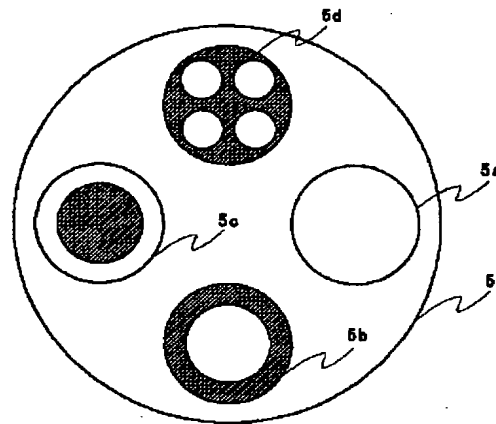
【図3】



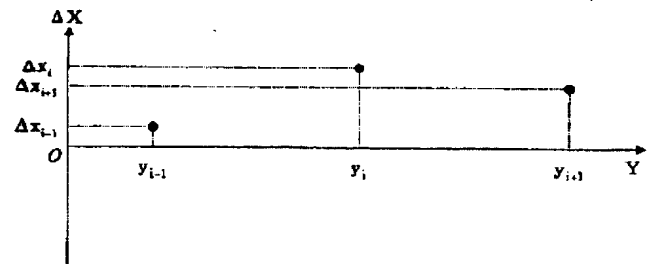
【図2】



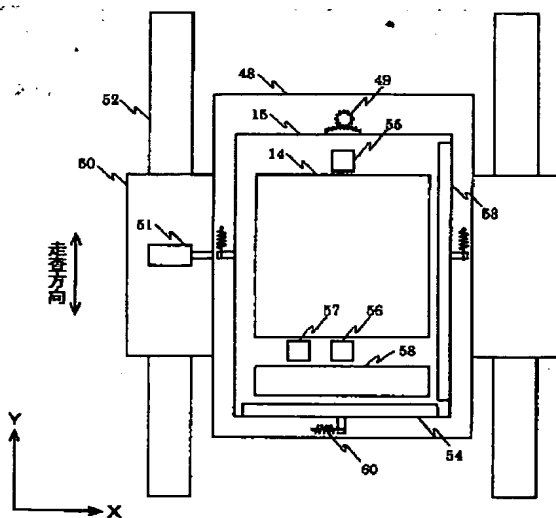
【図4】



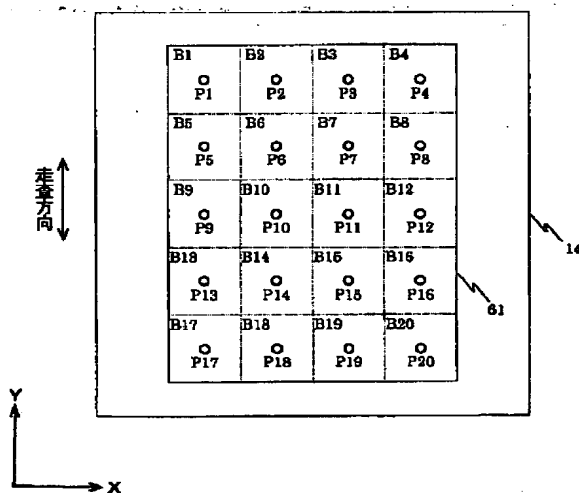
【図8】



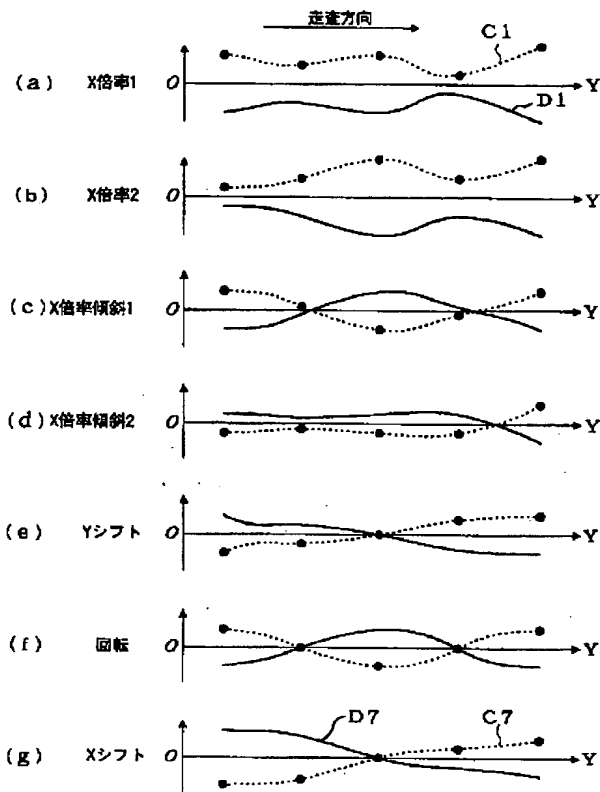
【図5】



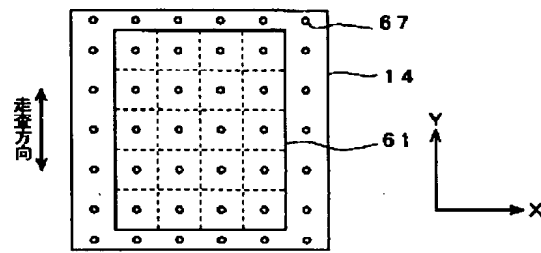
【図6】



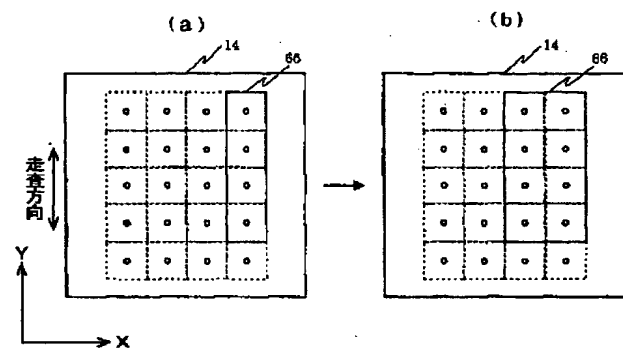
【図7】



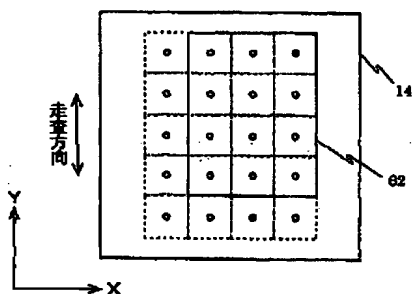
【図9】



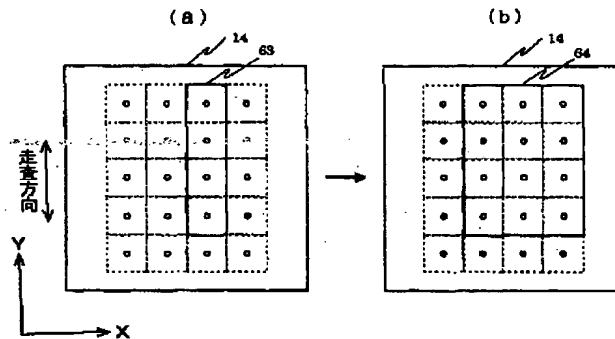
【図12】



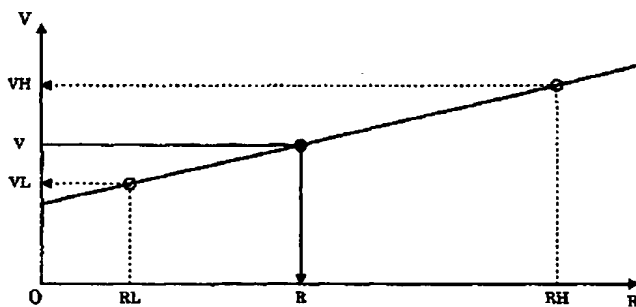
【図10】



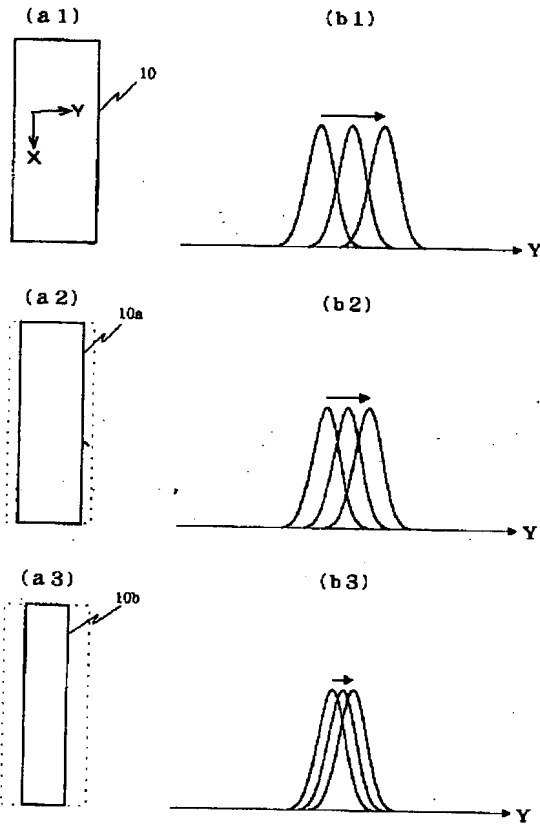
【図11】



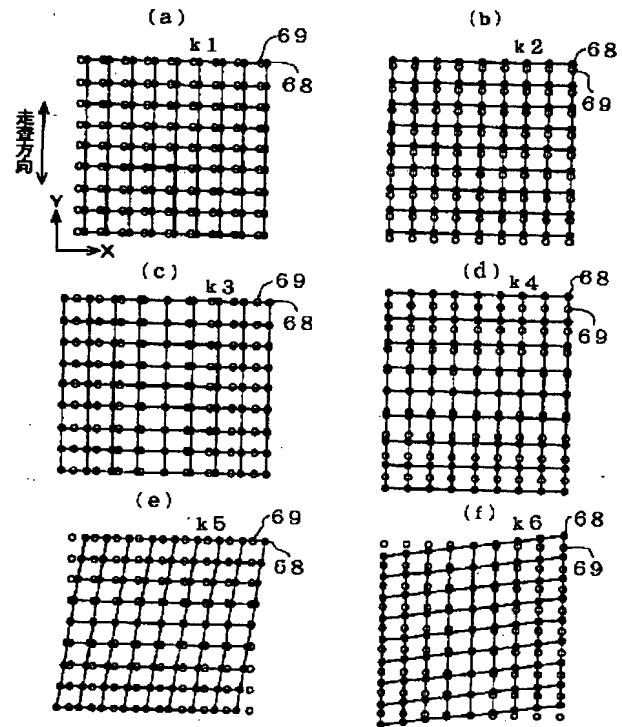
【図13】



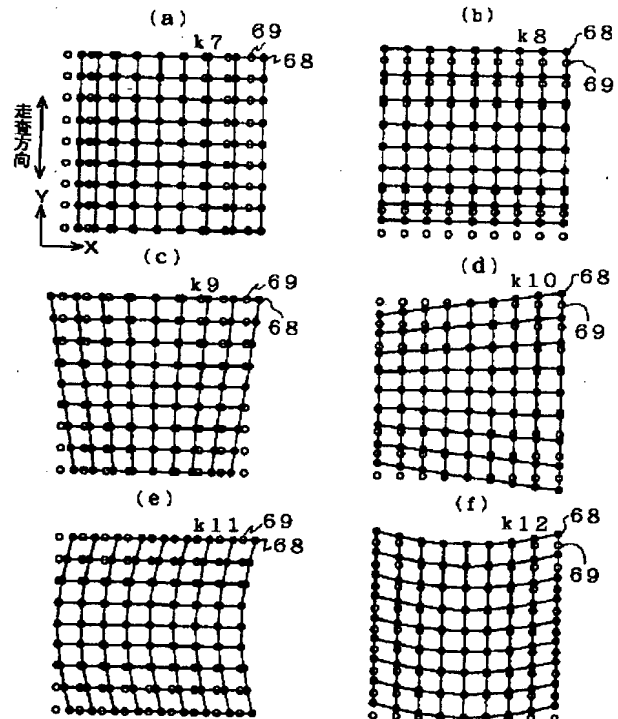
【図14】



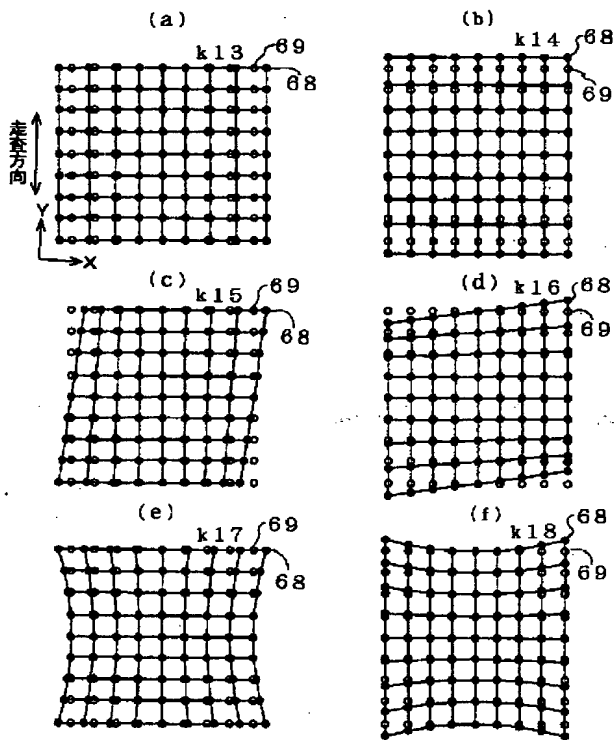
【図15】



【図16】



【図17】



【図18】

